TURING 图灵新知



玩转无人机

[法]鲁道夫 · 乔巴尔◎著 | 吴博◎译



中国工信出版集团



人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS

数字版权声明

鲁道夫·乔巴尔

Rodolphe Jobard

法国无人机技术专家，Dronea公司创始人，曾在法国和英国从事电力技术工作达15年，现在致力于工业领域专业无人机的研发和制造工作，是法国无人机摄影、测绘和建筑安全检测行业的领军人物。

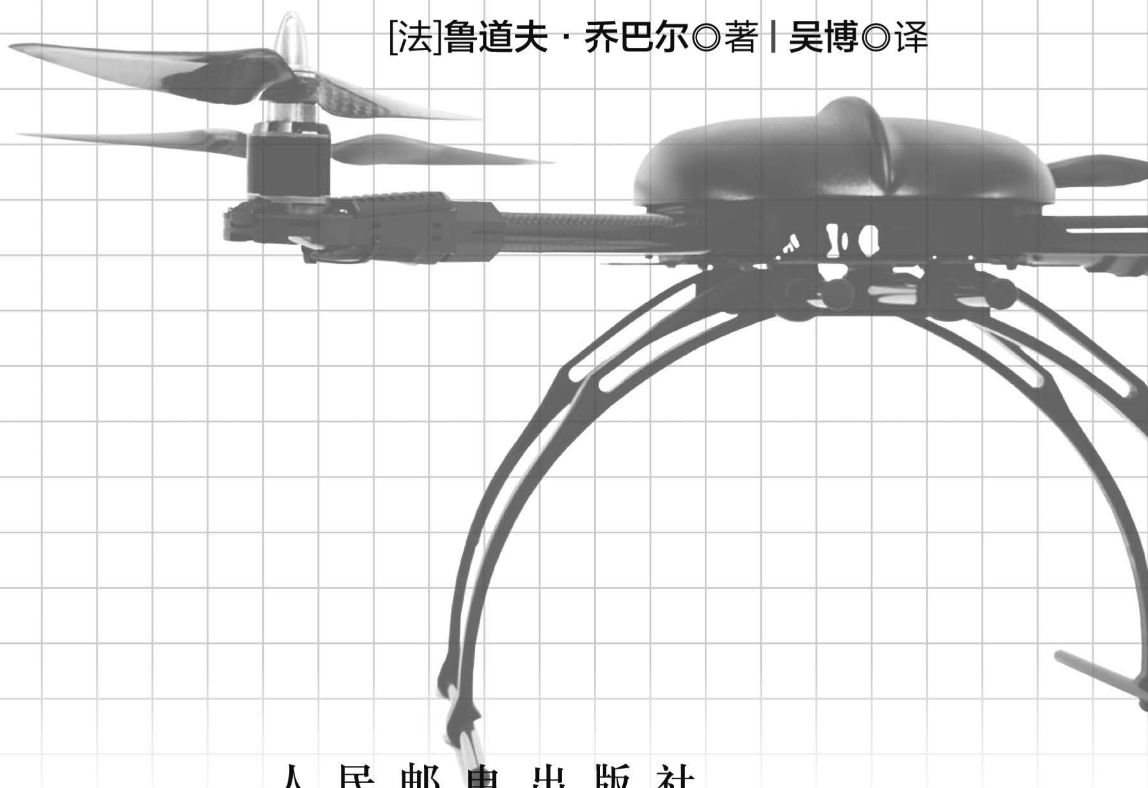
吴博

法国巴黎高等翻译学院（ESIT）硕士，现任吉林华桥外国语学院法语教师，曾参与《日军侵华战争图册》《远东国际军事法庭庭审记录》等国家重点图书项目的编译工作。

TURING 图灵新知

玩转无人机

[法]鲁道夫 · 乔巴尔◎著 | 吴博◎译



人 民 邮 电 出 版 社

北 京

图书在版编目（CIP）数据

玩转无人机 /（法）乔巴尔著；吴博译. -- 北京：
人民邮电出版社，2015.11
ISBN 978-7-115-40471-8

Ⅰ. ①玩… Ⅱ. ①乔… ②吴… Ⅲ. ①无人驾驶飞机
Ⅳ. ①V279

中国版本图书馆CIP数据核字（2015）第227325号

版 权 声 明

内 容 提 要

本书从无人机的发展历程、技术性能、飞行原理、制作窍门、操作技巧、实际应用与相关法规等角度，全方位介绍了民用无人机，展现了这场技术革新的发展状况与应用前景，为广大无人机和飞行器模型爱好者提供了入门指导，也为无人机制造、运营领域的专业人士和无人机驾驶员提供了参考。

◆ 著　　　[法] 鲁道夫·乔巴尔
译　　　吴　博
责任编辑　傅志红
执行编辑　戴　童
责任印制　杨林杰

◆ 人民邮电出版社出版发行　北京市丰台区成寿寺路11号
邮编　100164　电子邮件　315@ptpress.com.cn
网址　http://www.ptpress.com.cn
北京　　　　印刷

◆ 开本：700×1000　1/16
印张：11.5
字数：257千字　　2015年11月第1版
印数：1-4 000册　　2015年11月北京第1次印刷

著作权合同登记号　图字：01-2015-2155号

定价：59.00元

读者服务热线：(010)51095186转600　印装质量热线：(010)81055316
反盗版热线：(010)81055315
广告经营许可证：京崇工商广字第0021号

序言

飞行器远程驾驶系统（RPAS[①]）指的就是本书所称的“无人机”。欧洲飞行器远程驾驶系统行业由大型产业和中小企业 / 工业这两大力量支撑，各自包括生产商、运营商[②]、服务供应商（参见表 1）。民用无人机使用者分成三类：商业用户、非商业用户（包括企业活动和研究活动）、政府非军事运营机构。

目前，欧盟的欧洲航空安全局负责制定民用无人机法规。按照规定，民用无人机起飞时最大重量为 150 公斤。对于重量更轻的无人机的相关法令，则由各国航空管理部门[③]负责制定。

现在，德国、奥地利、丹麦、法国、意大利、爱尔兰、捷克、英国、瑞典等国家正在制定关于民用无人机的使用法规，而另一些国家，如比利时、芬兰、立陶宛、挪威和瑞士的相关法律即将生效，西班牙、马耳他、荷兰的相关立法正在筹备中。在全欧洲，针对轻型无人机的法律法规并没有统一标准。在大多数国家，无人机相关法律的实施促进了认可运营商[④]和委托运营商[⑤]数量的快速增长。运营商提供各种空中服务，服务种类也不断增多（参见表 2）。

---

① 国际民用航空组织建议，在日常技术应用中使用“飞行器远程驾驶系统”（Remotely Piloted Aircraft System）和“远程驾驶飞行器”（Remotely Piloted Aircraft）这两个术语，而不建议使用“无人操作系统”（Unmanned Aircraft System）和“无人驾驶飞行器”（Unmanned Aerial Vehicle）。

② 运营商，指从事飞行器远程驾驶系统操作或经营相关业务的个人、企业、组织。

③ 欧盟 28 个成员国中，每个国家的航空管理部门都针对起飞重量小于 150 公斤的无人机制定了各自的法规、认证、民用无人机行动许可发放等政策，对操控人员（远程遥控人员和观察员）和雇佣操控人员的运营商加以管理。

④ 认可运营商：在已经拥有相关法律法规的国家里，获得国家航空当局批准认可的运营商。

⑤ 委托运营商：在没有相关法律法规的国家里，相关部门必须根据具体情况批准无人机的飞行活动，获得该国航空当局许可的运营商被称为“委托运营商”。

表 1　无人机产业

<table>
<tr><th>领域</th><th>活动</th><th>产品 / 服务</th></tr>
<tr><td rowspan="11">大型产业

> 250 名员工；
营业额 > 5000 万欧元</td><td rowspan="7">研究设计
生产
整合</td><td>系统</td></tr>
<tr><td>子系统</td></tr>
<tr><td>组件</td></tr>
<tr><td>驾驶员培训</td></tr>
<tr><td>维修培训</td></tr>
<tr><td>实用载荷培训</td></tr>
<tr><td>运营商培训</td></tr>
<tr><td>生产商 / 运营商</td><td>空中作业</td></tr>
<tr><td>运营商</td><td>空中作业</td></tr>
<tr><td>研究及测试</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>其他服务</td></tr>
<tr><td rowspan="16">中小企业 / 中小工业

< 250 名员工；
营业额 < 5000 万欧元</td><td rowspan="6">研究及设计
生产
整合</td><td>系统</td></tr>
<tr><td>子系统</td></tr>
<tr><td>组件</td></tr>
<tr><td>驾驶员培训</td></tr>
<tr><td>维修培训</td></tr>
<tr><td>实用载荷培训</td></tr>
<tr><td>生产商 / 运营商</td><td>空中作业</td></tr>
<tr><td>运营商</td><td>空中作业</td></tr>
<tr><td>资格实体</td><td>评估</td></tr>
<tr><td rowspan="5">教育 / 培训</td><td>驾驶员培训</td></tr>
<tr><td>维修培训</td></tr>
<tr><td>实用载荷培训</td></tr>
<tr><td>运营商培训</td></tr>
<tr><td>其他</td></tr>
<tr><td>研究及测试</td><td rowspan="2"></td></tr>
<tr><td>其他服务</td></tr>
</table>

来源：布延比尔

为了更加简便，认可运营商和委托运营商被统称为认证运营商[①]。事实上，欧盟目前共有 1700 多家民用无人机认证运营商。在法国，无人机相关法令于 2012 年 4 月生效。现在，法国民用无人机运营商数量约为 650 家，法国因此成为世界上民用无人机认证运营商数量最多的国家。这也清楚地说明，无人机产业在创造就业岗位方面也是活力十足。

① 认证运营商：拥有符合应用要求的官方认证并获得证书的运营商。

在所有情况下，无人机当前的飞行作业几乎都属于视觉作业（操控人员能直接看到无人机），飞行高度距离地面低于 152.4 米（即 500 英尺），无人机起飞时最大重量小于 25 公斤。此类无人机通常由中小企业 / 工业制造。值得指出的是，法国无人机相关法规中包括了无人机脱离操控人员视野飞行的规定。欧洲很多国家的航空管理部门为无人机作业大开方便之门，根据每次的具体情况发放许可。现在，以法国为首的欧洲无人机业界发起倡议，目的是在更广泛的领域使用无人机，并获准使用更大型的无人机。

表 2　民用无人机可以进行的空中作业

商业活动与非商业活动（包括企业活动）	训练 / 飞行检查	其他	本表中所用术语列表
- 空中广告 - 空中检查 - 空中检测 - 空中观察与监视 - 空中巡逻与定位 - 空中摄影、摄像、拍摄电视和电影 - 空中摄影测量和空中地图绘制 - 空中粉碎并撒播固体 - 科学研究活动 - 协助搜索、救助行动	- 双人（拥有资格证书的操控人员教授学生） - 单人（在没有协助的情况下单独驾驶） - 检查（验证操控人员资质，授予操控人员证书）	- 试验、测试 - 示范 - 护航 / 定位 - 航空展会、竞赛、公开表演	- **检查**：发现缺点、错误、问题、缺陷、特别现象的检视审查 - **检测**：在特定时间内定期观察 - **观察**：检视活动、人、群体、地区、现象 - **巡逻**：在指定区域寻找活动、人、群体、特定现象 - **定位**：寻找并记录活动、物体、人、群体、区域、现象的地理坐标 - **监视**：对活动、人、群体、区域、现象的详尽观察 - **空中摄影测量**：仔细查看写明地理标注的土地地表（包括地表建筑），目的是研究或测量海拔、角度、距离、地面现象、飞行经过的地表建筑

来源：布延比尔

欧洲各国越来越多的政府部门，比如负责国内安全的市级警察、国家警察、反恐机构、城市消防队、森林消防队、海岸防卫队、国民卫队和环境保护机构，以及负责欧盟各国边境安全的欧盟国家边境管理局（Frontex），都对使用无人机表现出极大的兴趣。另外，一些大型企业，如电网管理企业、输油管道管理企业、铁路企业、石油公司，也意识到无人机可以承担很多任务，而且，从经济效益角度看对企业也非常有利。无论如何，是否使用非军用无人机取决于飞行时间所需的花费。

欧洲民用无人机产业得以蓬勃发展，在较短时间里迅速增长。如今，无人机也逐渐迈向欧洲一体化的道路。无人机相关的各方，尤其是欧洲无人机产业界，应该表现出足够的理解与成熟，与欧盟委员会协同合作，遵守欧洲计划规定的无人机发展相关导向政策。无人机产业有关各方将迈进无人机欧洲一体化进程的最后阶段，实现无人机在欧洲自由通行



和相关服务在欧盟全面覆盖的目标。这样，不但对欧洲无人机产业各方有利，而且对全球无人机界同样大有裨益，向世人展示了无人机一体化的目标完全可以实现。

本书作者鲁道夫·乔巴尔是民用无人机应用领域的先驱。这本书将打开令人神往的无人机世界之门。

彼得·冯·布延比尔（Peter van Blyenburgh）

国际无人机系统协会[①]会长

① 国际无人机系统协会（UVS International）：在荷兰海牙注册、总部位于法国巴黎的非营利性协会，通过各种活动致力于推动无人机发展，总部设在巴黎。该协会代表 41 个国家和地区的 850 多家企业和组织（制造商、运营商、包括无人机操控人员学校在内的服务供应商）。网址：www.uvs-international.org 或 www.uvs-info.com。

前言

人类学会驾驭火种，创造出文字，促进农业发展，推动科技进步，车轮、火药、指南针、电力等发明应运而生。人类自问，为何甘冒奇险登上飞机侦察敌情、空袭敌军？此等任务无人机完全可以胜任。于是，21 世纪初发生了无人机在阿富汗和也门的空袭事件，这一军事行动饱受争议。自此，从农业博览会到各大工业集团的智囊团，几乎每个星期都有无人机在民事领域的新应用方案浮出水面。

本书探讨什么内容？

我们或许应该重申这个问题：什么是无人机？无人机是没有飞行员驾驶的飞机或者直升机。人们往往以为，无人机仅仅会在战场或者学校操场上飞过我们头顶，实际情况并非如此。无人机用途极其广泛，可以用传感器代替人类的五感，依据操作者的意愿上天入地。民用无人机要比其前辈——军用无人机更加“无孔不入”，其应用已经渗透到公共秩序、媒体、农业、工业、运输等众多领域，以其操作简单、价格低廉的优势倍受青睐，一场新工业革命蓄势待发。

人们都听说过“无人机”这个词汇。然而，亲眼看到天空上飞翔的无人机时，大家恐怕还是会问：为什么有些无人机有几对旋翼，而有些只有固定机翼？驾驶无人机容易吗？无人机能飞多高？操纵无人机前往一些地方是否合法？无人机怎样处理数据？作为一本介绍无人机，尤其是民用无人机的入门图书，本书不但会一一解答上述问题，还会讲解其他方面的知识。书中采用大量照片和图示，对无人机当前采用的技术和实际应用给予了详细说明。

本书结构如何？

本书分为七章。

- 第一章介绍无人机简史，展示无人机如何从军事领域进入民用领域。和所有革新一样，无人机采用的诸多技术起初并非专为打造无人机而生，比如：锂电池、新一代电动机、机器人技术、移动通信技术、全球卫星定位系统、数字照相机……

- 第二章介绍不同种类的无人机。无人机超越了传统飞机的限制，外形前所未见，而且种类繁多，其中占主导地位的是多旋翼无人机。本章还会详细分析无人机系统的各个部分：机身、地面控制台、弹射装置、回收装置等。
- 第三章回顾如何令“比空气重”的物体飞行这一现象，以此讲解相关的主要知识，介绍无人机的运行原理。这样，读者可以更好地理解无人机的各方面性能，诸如稳定性、持续性、速度、有效荷载。本章还会谈到天气对飞行的限制问题。
- 第四章专门描述驾驶无人机的不同方式，准确地说，是“远程驾驶”无人机的方式：通过机上实时反馈的图像，凭借视觉判断手动驾驶；或者，依靠配备地图绘制导航程序的计算机驾驶。无人机凭借自动连续飞行技术能够完成绘制地图、全景呈现等任务，但自动飞行的同时也会带来新的危险。
- 第五章详细介绍民用无人机的各种应用。尤其值得一提的是，本章会给出用无人机在空中成功拍摄照片和视频的建议，空中拍摄照片和视频是无人机当前的一个重要应用。同时，本章还会介绍在地形测绘、二维三维制图、建筑检测方面的应用，其中二维三维制图的应用在地形测绘领域更是大获成功。读者在本章可以了解到无人机的用途，看到目前尚为纸上谈兵的诸多畅想。
- 第六章介绍法国及欧洲司法领域针对于无人机应用制定的相关规定，如远程驾驶的资质、无人机法定飞行方案、禁飞区规定……同时也会谈到无人机对私人空间的侵犯问题。
- 最后一章讲述一些实践内容，介绍如何自己动手制作无人机，并成功将其放飞天空，以及常见故障解决方法。

本书面向哪些读者?

所有人都可以阅读本书。这其实是一本专为以下人群量身定制的读物：想给自己的住所航拍照片的人、希望使用无人机执行某一特殊使命的人、想要尝试无人机贸易的人。当然，还有对蓬勃发展的无人机技术充满兴趣的人们。

致谢

我在此对国际无人机系统协会会长彼得·冯·布延比尔为本书作序表示由衷感谢。感谢本书编辑安东尼·德鲁安（Antoine Derouin）在我创作期间给予的指导与支持。

我还要感谢所有参与本书创作的人：桥梁、水域、森林名誉工程师雷蒙·罗索（Raymond Rosso），Polyvionics 公司创办人兼主管斯蒂芬·盖里（Stéphane Querry），法国国家地理林业信息学院摄影测量学博士文森·图纳德尔（Vincent Tournadre），以及所有为本书贡献照片的朋友们。

我还要感谢我母亲，是她帮助我审阅文稿。感谢对我充满耐心的爱人！

目录

第一章
从军用无人机到民用无人机

“航空技术不是工业，不是科学，而是奇迹！”

——伊戈尔·西科斯基[①]

自航空技术诞生之初，军方就对无人驾驶飞机的概念很感兴趣，首先研制出飞行炸弹、靶机，然后又推出无人侦察机。无人机技术在20世纪70年代开始成熟。从20世纪90年代开始，卫星地理定位技术和通信技术为无人侦察机开辟了新道路。随后，这些技术逐渐走向民用领域，催生了民用无人机。

军用无人机简史

很多人以为无人机诞生于美国总统小布什执政的第二次海湾战争期间。此后，美国军方又利用无人机打击巴基斯坦和也门地区。实际上，自航空技术萌芽之日起，各国军方就开始研发不需要飞行员驾驶的飞机。随着技术的发展，无人机逐渐演化成飞行炸弹、无人机靶机、无人侦察机、无人机诱饵、步兵无人机……

第一批原型机

19世纪末，一些由胆大妄为的天才发明家创造和研发的航空技术很快吸引了军方的注意。在第一次世界大战期间，军方就掌握了足够的航空技术，将飞机应用于空中侦察、打击敌军等方面。早期的空战战场充满了视死如归的骑士精神，天空变成了众多王牌飞行员的坟墓。各国部队自然而然萌生了制造不需要飞行员操作的飞机的想法。但是，要达到这个目的必须拥有能够远程指挥、控制飞行的技术。1898年，塞尔维亚裔美国发明家尼古拉·特斯拉（Nikola Tesla）在一艘被命名为“远程自动控制装置”（Teleautomaton）的船上首次使用了无线远程控制系统。1909年，美国发明家埃尔默·安布罗斯·斯帕雷（Elmer Ambrose Sperry）成功研发出惯性测量仪的雏形——用于稳定飞机的陀螺仪。万事

① 伊戈尔·西科斯基（Igor Sikorsky），俄裔美国发明家，著名飞机和直升机设计师，现代直升机技术的奠基人。——译者注

俱备，自动飞行器首航的一切准备工作已经就绪。

研究无人机最初的目的是轰炸敌军。1918 年 10 月，美国发射了首枚飞行炸弹，那是一架翼展长 4 米、名为“凯特灵虫”（Kettering Bug）的小型双翼飞机，这种飞机被看成导弹的“简易”始祖，但其飞行距离已有 120 公里，可承载 85 公斤炸药。

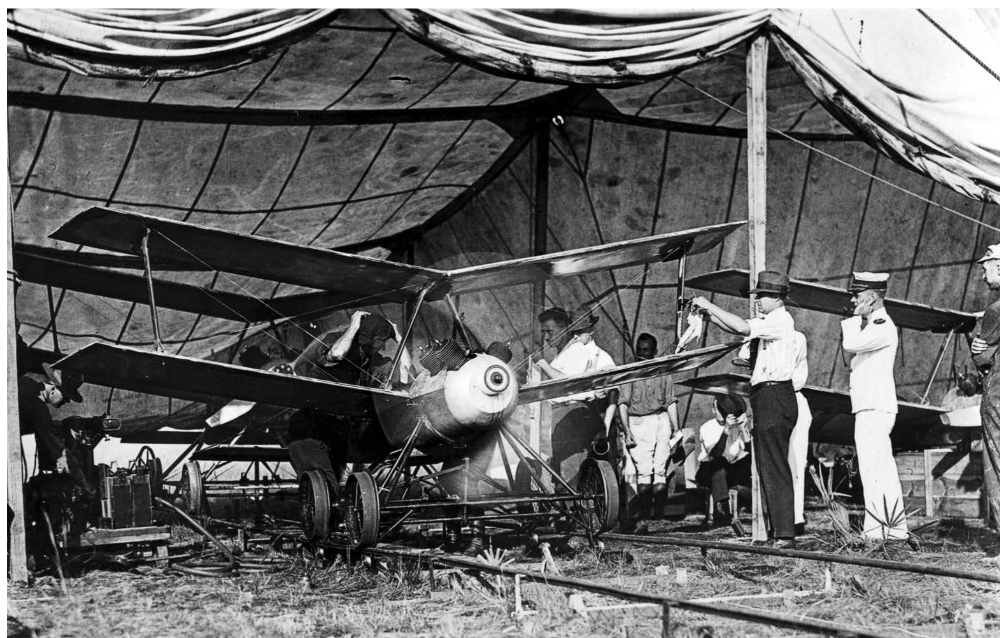


图 1-1　“凯特灵虫”，真正的空中鱼雷

为了确定飞行距离，技师们事先预设好引擎转数，在飞行过程中，引擎达到预定转数后旋即停止运行，机翼翻转，飞机直线下落坠毁。当时，一共生产了 45 架“凯特灵虫”，却从没有在实战中应用过，因为参谋部认为这种飞机给己方部队和盟友部队都造成了威胁，其危险不亚于敌军轰炸。

另外，1918 年 9 月，法国成功遥控老式轰炸机“瓦赞八代”（Voisin Ⅷ）在封闭路线内飞行 100 公里。

由于缺乏精确度，加之存在无线电干扰的危险，大约又等了二十年，飞行炸弹才真正踏入实用阶段。在两次世界大战之间，主流思想主张把无人机做成靶机，用来训练炮兵、防空部队或飞行员——遥控靶机飞行，请其他部队练习射击，的确比让靶机在自己身后追着跑要安全得多。而且，这也是一种回收利用第一次世界大战大量库存飞机的好办法。于是，英国在 20 世纪 30 年代末把“虎蛾”（Tiger Moth）双翼飞机改造成靶机，将其重新命名为“女王蜂”（Queenbee）。



图 1-2　英国“女王蜂”靶机

第二次世界大战期间

当年，无人机产业尽管不及航空业繁荣昌盛，但也开始名声鹊起。地处好莱坞附近的“无线电飞机公司”（Radioplane）曾经是风头最劲的无人机靶机生产厂商。一位名叫诺尔玛・简・多尔蒂的小姑娘，也就是后来大名鼎鼎的玛丽莲・梦露，在投身演艺事业之前曾经在这家企业工作过一段时间。

1944 年，肯尼迪家族的长子约瑟夫・肯尼迪参加了一项极度危险的任务：让装满炸药的无线电遥控飞机坠落，轰炸位于法国北部的德军 V3 导弹基地。约瑟夫必须登上飞机，操作飞机起飞，装好雷管后跳伞离开。一架护卫机通过无线电与电视保证无人机的远程导航。不幸的是，约瑟夫尚未来得及跳伞之前，飞机在空中爆炸，在此期间究竟发生了什么，也成为不解之谜。



图 1-3　1944 年在无线电飞机公司工作的玛丽莲 · 梦露

除了把无人机做成靶机之外，德军方面对无人机的发展方向却另有打算。在第二次世界大战的参战各方中，德国是唯一能够工业化批量生产并在实战中应用“飞行炸弹”的国家：首先出现的是翼展 6 米、长 8 米的 V1 飞弹，能够携带大约一吨炸药，可飞行 200 公里，在飞行速度达到 600 公里 / 小时的时候，精确度约 12 公里。V1 飞弹更主要的作用是侵蚀盟军斗志，而非摧毁敌方设施。

后来，V1 飞弹被各方面性能更加卓越的 V2 飞弹所取代。V2 飞弹由火箭引擎推动，射程 320 公里，飞行速度 5000 公里 / 小时。V2 飞弹几乎无坚不摧，甚至可以飞入太空。



图 1-4　德军运输 V1 飞弹



图 1-5　V2 飞弹

当时，德军已经能够利用自己的技术制造出其他型号的无人机。1943 年 9 月，盟军缴获的意大利装甲船“罗马号”（Roma）被一枚“鲁赫斯塔赫”SD 1000 飞弹（Ruhrstahl）以前所未有的精确度击中。这种飞弹发射以后，制导团队一直远程遥控飞弹直到击中目标。盟军很多舰船同样难逃厄运，遭到更先进的导弹——“亨舍尔”HS 293 飞弹（Henschel）袭击。盟军方面也针锋相对，研发出成熟的应对策略，比如无线电干扰、摧毁导航飞机等。



图 1-6　亨舍尔 HS 293 飞弹

第二次世界大战结束、冷战启幕

德国自动飞行和远程遥控技术明显遥遥领先，因此，盟军各国攻入德国后争相寻找科技装备与科研人员，用“逆向工程”的方式，从拆解开始，学习仿造德国装备，科研人员则被邀请移居到各方战胜国。于是 V1、V2 飞弹之父——沃纳・冯・布劳恩受邀前往美国，获得更多的预算，继续研究火箭技术。

和第一次世界大战结束后的情况类似，1945 年，各国拥有大量库存飞机，应该让这些飞机发挥作用。因此，美国决定把“赫尔卡特幽灵机”（Hellcat Phantom）改装成无人机，用于在太平洋原子弹试验后提取空气样本。

冷战随后爆发，推动了无人机技术迅猛发展。想象一下，倘若战端开启，大规模坦克部队在欧洲汹涌袭来，炮兵部队首先需要高效的侦查方式。这类任务对于由飞行员操纵的普通飞机来说非常危险，所以，催生了战术无人机（也被称为“无人侦察机”）。无人机以高速低空掠过战场上空，给常规目标或者核武器拍照。然后，无人机凭借降落伞着陆，军

队立即回收，再洗印胶片。陆军最接近战场，他们可以不呼叫空军协助，转而使用无人机，这一战术让处理信息的时间缩短，实现迅速反击。因此，法国在 20 世纪 50 年代根据德军的 V1 飞弹研发出卡车运载的小型战术无人机 CT-10、CT-20，然后是 R20。



图 1-7　R20 战术无人机

与之一脉相承的最新一代产品是“临时战术无人机系统”（SDTI）无人机：这种螺旋桨飞机翼展 4 米、依靠弹射器起飞，最大飞行时间 5 小时，借助降落伞着陆。这种无人机在科索沃和阿富汗地区曾经得到大量应用。



图 1-8　SDTI 无人机

从战略角度看，军方希望无人机技术不要仅仅在臆想战场的上空漫步。铁幕两侧的阵营尽管名义上处于和平状态，其实彼此迫切希望监视对方。美方使用 U2 侦察机在苏联境内实施高空侦查。1960 年 5 月，一架 U2 飞机被击落，苏联播出了一名安然无恙的机组人员遭俘虏的镜头。这一事件让美国舆论一片哗然，美国加速研制能够深入敌后执行任务的无人侦察机。

1962 年的古巴导弹危机使美方监视敌人的需要更加紧迫，可当时的无人机技术并不成熟。“瑞安”147 BQM-34① 无人侦察机有另一个更为人所知的名字——“萤火虫”无人侦察机，其翼展不到 5 米，可以由飞机投放，通过降落伞回收。1964 年，“萤火虫”首飞，侵犯中国领空。该无人侦察机在越南、中国等地执行任务，共飞行 3400 余次，其中几架飞机被中国军方击落。

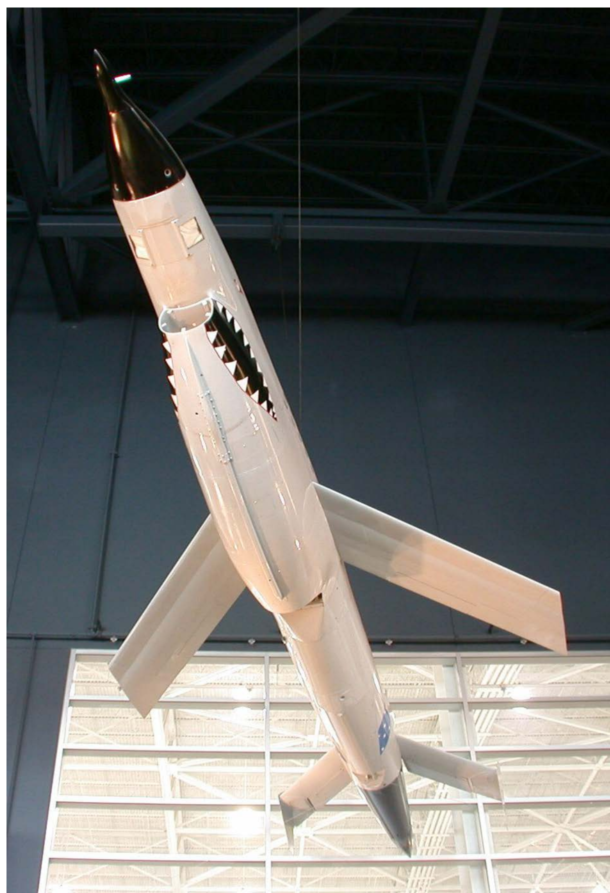


图 1-9 “萤火虫”，冷战时期的无人侦察机

① 无人机名称中英文对照表请参见附录 B。——编者按

尽管美国在冷战时期使用的无人机技术获得了无可争议的巨大成功，但是，无人机在防空炮火和战斗机面前仍显得脆弱无力，极易遭到攻击。鉴于无人机的缺陷和损失，加上遥控导航技术并没有完全成熟，无人机在美军眼中渐渐失去了价值。美军从越南撤军之后，无人机技术也被束之高阁。

反恐战争

1982 年，以色列接下了无人机技术研发的火炬，获得举世瞩目的成就。在“加利利和平行动”中，以色列在进攻贝鲁特时，使用无人侦察机与由飞行员驾驶的飞机协同行动，同时，还使用小型无人机作为诱饵迷惑敌方的防御力量。很快，以色列取得制空权，为其展开地面部队行动提供了很大便利。恐怖主义威胁对以色列来说如同芒刺在背，促使其在无人机领域保持领先地位，与美国分庭抗礼，共同引领无人机技术的尖端科技，以色列无人机出口量占该市场总量的 70%，主要出口南非。

2001 年 9 月 11 日，纽约世贸大厦遭到恐怖袭击。而后，以围捕阿富汗境内基地组织为共同目标的反恐同盟在同一年诞生，并从 2003 年起在伊拉克继续与基地组织作战。在这场战斗中，美军有一条不成文的规定：依靠情报工作的长期性与准确性，尽可能不让部队处于危险境地，在远离美国本土的战争中实现“零阵亡”。因此，军队需要长期拥有可靠的侦查监视技术。

美国通用原子公司将 MALE（Medium Altitude Long Endurance，意为“中海拔、长时程”）无人机系统安装在“掠食者”无人机身上。这种无人机与当时已生产的所有无人机都截然不同，专门为了长时间飞行和执行侦查任务而设计，可以在数千公里之外远程导航，能满足美军所有需要。“掠食者”翼展 16 米，机翼很长，类似滑翔机机翼，由螺旋桨引擎推进。机身背部有卫星通信天线。尾翼呈 V 字形，比传统的尾翼矮，更容易安置。这种无人机可以在 7000 米海拔高度连续飞行 40 小时，一些型号可以飞行 12 000 公里。MALE 无人机系统从 1995 年开始接受测试，在阿富汗战场上成为联军情报机构的主要工具。

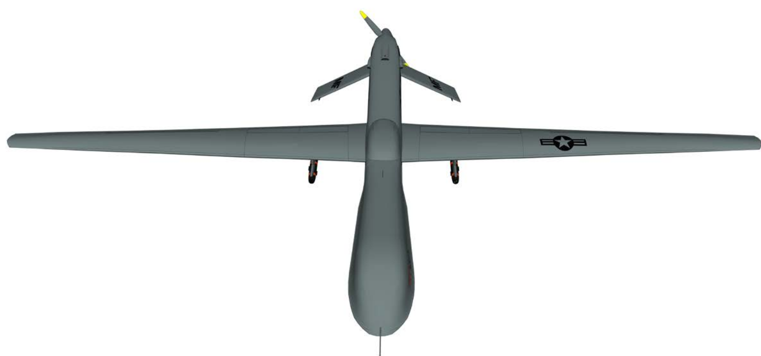


图 1-10　MALE 掠食者

在此之前，类似侦查工作都是由卫星承担的。无人机可以直接飞到想要侦查的地点，显得更加灵活，而卫星则必须按照固定轨道运行，只能等到在轨道上经过目标地点时才可以工作。而且，无人机飞行高度较低，拍摄的照片更加清晰。不过，卫星并不是无人机的竞争对手，恰恰相反，卫星可以通过地理定位以及 20 世纪 90 年代研发成功的全球卫星定位系统（GPS）为无人机导航。卫星还可以为控制无人机飞行和现场传送图像提供中转服务。

“掠食者”无人机还被创造性地赋予了新身份——攻击性无人机。此前，无人机的作用仅仅是发现目标，然后会被敌军飞机或者高射炮击毁。“掠食者”无人机配备武器，彻底扭转了这种劣势。它可以在任务的后半程自动填弹，并探测攻击造成的损失范围，其处理数据的时间大大缩短，而精确度则大大增强。“掠食者”无人机于 2001 年在伊拉克发射了第一枚导弹，之后在也门发动了第二次袭击。

不过 MALE 无人机系统存在一个重大缺陷：速度慢，最高速度仅为 200 公里 / 小时。如果目标距离远，无人机的航程需要花费很长时间，也就是说，可以用在观测目标的时间就会相应变短。而 HALE（High Altitude Long Term Endurance，意为“高海拔、长时程”）无人机系统则有效弥补了这一缺陷。相应的飞机配备喷气式引擎，速度是 MALE 无人机系统飞机的三倍。比如诺斯普诺·格鲁门公司的 RQ-4“全球之鹰”无人机的最高飞行高度可达 18 000 米，其体积如同航班客机（翼展 40 米），续航能力约 40 小时。



图 1-11　HALE 全球之鹰

无人机这种新型工具的成功主要依赖于军方的肯定。在法国和美国，陆军与空军对无人机操作人员应接受的训练内容要求并不相同。操作空军无人机的人员必须接受过飞行员

培训，而陆军对操作无人机人员并没有这样的要求。在美国，空军与陆军配备有各自的“掠食者”无人机，空军愿意手动操作，而陆军更信任自动驾驶。结果是，手动操控的无人机出现的事故更多。在伊拉克，曾共有超过 700 架各式各样的无人机服役，美国军方不得不对空中交通管制问题加以考虑。

在法国，比起无人机，空军更加偏爱飞行员驾驶的飞机，比如“阵风”战斗机和 A400M 运输机。法国军方没有研发自己的 MALE 无人机，而是与以色列合作，把以色列“苍鹭”无人机法国化，改造成“雪鸮”无人机。自 2010 年起，已经有四架“雪鸮”无人机在阿富汗、利比亚、马里服役，后来被 MQ9“死神”无人机取代。



图 1-12　MALE 雪鸮

开启迷你时代

自 21 世纪初，微型化技术让研制放入背包里的便携式无人机成为可能。如果敌人布下陷阱、准备伏击，装备这种无人机的步兵可以不必身犯险地就能够看到山丘或者建筑物背后的情况。无人机变成了一种带着翅膀的望远镜。美国天空环境公司研发了 RQ-11“渡鸦”迷你无人机，固定机翼翼展 1.3 米，质量不足 2 公斤。该无人机配备摄像机和视频接收器，活动范围 10 公里。步兵手持投出这种无人机，起飞后可以通过视频接收器在屏幕上看到图像。在降落时，无人机尾翼转向，无人机随重力落下，撞击地面时，机翼与机身分离成几个部分，而分离的部分很容易重新组装，便于下次飞行。这些特点为 RQ-11“渡鸦”迷你无人机赢得巨大成功，行销 20 多个国家，销量达到 20 000 架。

加拿大艾伦研发公司生产出不到 2 公斤重的四旋翼无人机——“艾伦侦察机”，用于在城市环境中收集信息。机上配载了稳定的陀螺仪摄像机，持续飞行时间约 25 分钟。这种无人机启动时间很短，而且这种无人机坚固耐用、易于操作。



图 1-13 RQ-11“渡鸦”迷你无人机



图 1-14 “艾伦侦察机”迷你无人机

军用无人机的未来

无人机能够代替战斗机吗？想实现这一愿望，无人机必须更敏捷、有隐形能力、续航能力更强。目前仍处于试验阶段的 UCAV（Unmanned Combat Aerial Vehicle，意为“无人作战飞机”）无人战斗机能够满足这些需求。

达索“神经元”无人机的模型在 2011 年布尔日航空展上亮相，该无人机于 2012 年 12 月首次飞上天空。



图 1-15　1∶1 大小的“神经元”无人机模型亮相 2011 年布尔日航空展

从美国到欧洲，包括伊朗和印度在内的五十多个国家都在研发军用无人机。无人机技术的广泛传播，让拥有这项技术的国家不再占据明显的优势。在没有预先警告的前提下使用无人机清除恐怖组织，容易造成平民伤亡，这种做法遭到全体民众的一致反对，同时引发了大众对无人机使用问题的争论。

表 1-1　部分正在服役的无人机

名称	国家	类型	续航能力（小时）	活动半径（公里）	最高速度（公里 / 小时）	最高飞行高度（米）
SDTI	法国	战术无人机	5	200	240	3800
掠食者	美国	MALE	部分型号可达 40	6780	222	7680
全球之鹰	美国	HALE	部分型号可达 40	22 780	635	18 300
神经元	欧洲	UCAV	2	2280	980	14 000

随着西方部队从伊拉克和阿富汗撤军，军用无人机的市场陡然缩小。尽管有人尝试向平民销售迷你无人机，但结果往往不尽如人意：一方面，军用无人机对普通人来说太过专

业，普通民众不需要获取即时信息，也丝毫不介意多花上几分钟启动无人机；另一方面，军用无人机和军民两用无人机的使用受到商业法规的严格限制。最早的是美国《国际武器贸易条例》中的相关规定。不论销售目的何在，在美国从事出口“防御器材”和“防御服务”的行为都受到该《条例》的制约。此外，美国还针对军民两用产品制定了《出口管理条例》(简称 EAR)。这些规章制度可能使销售延迟，令销售者受罚，甚至遭受刑事惩处。另外，由于军方认证的原因，军用无人机的售价也过高。

然而，军用无人机赋予了年轻一代企业家无限灵感，激励他们开发适合民众需要的无人机。20 世纪 90 年代和 21 世纪的技术革新将为这些企业家助上一臂之力。

民用无人机时代的到来

21 世纪之初，新兴科技让军用无人机的性能更加优秀，也促进了民用无人机的诞生。

科技演化与科技突破

地理定位：从陀螺仪到全球卫星定位系统

为了完成任务，飞行器必须精确了解自己所处的空间位置。直到 20 世纪 90 年代，自动驾驶仪只能依靠自身的惯性测量仪定位，惯性测量仪包括机械陀螺仪、与陀螺仪连接的磁罗盘和压力传感器。整个飞行过程中，飞行器通过测量自身承受的加速度实现定位。但是，除了机械本身的可靠性问题之外，惯性测量仪体积大而笨重，随着时间流逝，其精确度会降低。1995 年，全球卫星定位系统的到来改变了这种局面。从那之后，飞机可以用指甲大小的天线接收卫星发出的讯号，即时定位自身的位置。该系统的工作原理是：通过多颗人造卫星组成的卫星群(比如用 24 颗人造卫星工作的全球卫星定位系统)，或者俄国的格洛纳斯(GLONASS)全球卫星导航系统，抑或未来将投入使用的欧洲伽利略(GALILEO)卫星导航系统，将持续发送由原子钟测算而出、报告精确时刻与位置的信号，通过三边测量法计算出位置距离。为了准确定位，飞行器必须接收至少四颗人造卫星发出的信号，如果能接收到六颗或更多人造卫星发出的信号，则会提高定位的精确度。

这种技术起初由美军研发，而提供给公众的卫星信号被故意降低了精确度，于是，其误差在 100 米左右。在 2000 年 5 月，美国克林顿总统决定停止人为降低精确度的做法后，卫星定位技术才真正开始蓬勃发展。现在，定位的精确度在 10 米以内，随着发射信号的卫星数量增多，精确度仍在进一步提高。

微电子机械系统迷你化

2 毫米长的气压高度计、大小相仿的指南针、3 毫米的加速计……如今，没有活动部

件、不需维护的微型组件取代了以前的机械传感器，这种组件被称作“微电子机械系统”（MEMS），移动电话的普及促使这类系统进入工业化生产。现在，微型无人机自动驾驶仪的回路中就采用了微电子机械系统，包括传感器在内，自动驾驶仪的总重量不到 25 克。



图 1-16　微电子机械系统

数据联络通道

MALE 和 HALE 军用无人机使用卫星联络，有效距离无限宽广。民用无人机无法使用卫星联络，因为设备价格高昂，而且天线过大。不过，从 21 世纪开始，民用无人机可以使用高效又安全的数字无线电。以前，无线电一直使用频率 41 兆赫或者 72 兆赫的模拟信号，这种信号会遭到其他发射装置的干扰，而且电动引擎也会令信号停顿。进入 21 世纪后，出现了更高频率的数字模式无线电，频率达 2.4 吉赫。从初次使用开始，可以把发射器和接收器配对，让接收器只能识别遥控器发出的信号，这样就不会受到第三方的干扰。联络通道变成双向：发射器下达指令，同时接收机上反应传感器状态的信息。另外还有一个优点：发射器不需要以前 1 米长的遥控天线，也不需要机身外侧保持紧绷的接收器长线，现在的发射器和接收器只需 10 厘米长的天线而已。

无刷电动机（又名：磁力同步自动驾驶机）

丰田普锐斯（Toyota Prius）汽车、电动小型摩托、CD 光盘机都配备了无刷电动机。从 20 世纪 80 年代开始，无刷电动机替代了电刷电动机。如果没有无刷电动机的存在，众多多旋翼无人机（占民用无人机的 80%）将永远不会问世。

与前几代电动机不同，这种电动机需要直流电供电，电流通过引擎外部的连接器，连接器把直流电转化成三相交流电。该连接器通过调整每秒钟的脉冲数控制引擎速度，避免了传统直流电引擎的所有缺点，比如惯性，而且无刷电动机效率更高、寿命更长。

实用载荷：数字相机

拍摄照片、拍摄之后立刻查看、删除照片、重新拍摄、每次飞行拍摄储存数百张照片、修饰照片、用照相机镜头录制地面情况……20 世纪 90 年代末，在数字相机出现之前，如此花样繁多的功能几乎无法想象。自从进入 21 世纪，数字传感器凭借其惊人品质彻底取代了胶片技术，无人机的摄影测量法等新技术也随之问世。胶片摄影的洗印既昂贵又不方便，如果没有数字相机技术，无人机绝不可能如此繁荣发展。

新型制造材料

20 世纪 80 年代到 90 年代，复合材料和高强度塑料泡沫开始被广泛使用。复合材料是至少两种特性互补材料的结合体，因此，制成的复合材料拥有两种材料各自本来不具备的特性，比如坚硬与轻盈兼备。

复合材料质量轻，容易塑型，从 20 世纪 80 年代开始逐渐取代了用于制造空中客车和波音飞机的铝、钢和钛。现在，复合材料几乎占飞机总重量的 50%。生产总量的提高让生产成本下降，复合材料的价格逐渐能为大众接受，在大众市场上，复合材料以碳或玻璃纤维管或片的形式销售，这两种材料也是制造多旋翼无人机的主要原材料。

固定机翼无人机依赖空气动力学而飞上天空，采用塑料泡沫，通过模具制作出的流线外形也是基于空气动力学原理。发泡聚乙烯轻巧、坚固、容易制作，成为小型固定机翼无人机流线型外壳和机身的标准制作材料。

从娱乐到专业应用

在航空业，人们一直通过制作体积较小的模型用来测试设计理论、改善已有机型，或是用于教育教学。随着 FM 调频无线电遥控技术的出现，飞机模型制造技术在 20 世纪 70 年代得以迅速繁荣发展。但是，由于没有可用的自动驾驶方式（在全球卫星定位系统出现以前），飞行只能依靠遥控者的反应速度和敏捷度。飞机驱动的主要方式是热力引擎，这种引擎并不可靠，容易产生震动、积存污垢，所以需要仔细维护保养。当时，机身往往用木料制成，组装时间长，使用寿命短。另外，在胶片摄影占主导地位的年代，机载照相机能够做的工作极其有限，当时的“民用无人机”仅仅用于娱乐。

在 20 世纪 80 年代，手提摄像机的出现逐渐改变了这种情况。大型遥控直升机促进了一些媒体应用的问世，比利时飞行镜头公司的无人直升机配备摄像机，在巴黎香榭丽舍大道上空航拍法国大革命二百年纪念庆典开幕式，给人们留下了深刻印象——直升机在巴黎上空距离地面十几米的地方翱翔，然后穿过了凯旋门。传统直升机根本无法实现这种动作。



图 1-17　20 世纪 80 年代，一名航模爱好者：12 岁的航模制作者和他的模型“格洛普纳的士”（Taxi Graupner）

在民用无人机领域里，一个国家从 20 世纪 90 年代开始占据了特殊地位，这个国家就是日本。日本农民在小片稻田里用无人机大规模喷洒农药。雅马哈公司推出 99 公斤重、可携带 20 升液体的无人机“Rmax”，凭借无人机总数达到 3000 架、年销量 300 架的规模，占据无人机市场的龙头地位。在日本农业部的鼓励下，无人机产业大获成功。日本农业部认为，使用无人机可以暂时缓解日本农村缺少劳动力的压力。

新技术的涌现以及成本的降低，让民用无人机的企划方案从 2005 年开始激增（参见表 1-2）。尽管民用市场仍然没有超过军事领域的应用规模，但二者的差距缩小了一半。

表 1-2　2005 年至 2013 年无人机的企划方案

年份	民用 / 商业	军用	军民两用	研究 / 试验
2005	55	397	44	254
2006	47	413	77	248
2007	61	491	117	315
2008	115	578	242	347
2009	150	683	260	395
2010	171	631	283	367
2011	175	674	318	379
2012	217	548	353	260
2013	247	564	392	250
2005 到 2013 年的发展增幅	×4.5	×1.4	×8.9	平稳

来源：国际无人机协会

过去，使用无人机要首先获得许可证。自 2012 年起，大多数欧洲国家对无人机的使用限制放宽。于是，大众对无人机的迷恋也风行起来。无人机的使用弹性空间很大，能够执行各种各样的任务，将来一定会诞生更加丰富多彩的无人机种。

第二章

无人机的结构

“我进行的各种测算结果印证了专家意见：我们的想法无法实现。摆在面前的只剩一条路——实现这个想法。”

——皮埃尔－乔治·拉德科艾[1]

三翼、四翼、六翼……甚至还有更多旋翼无人机、飞翼无人机、扑翼式无人机、柔性机翼无人机等。无人机从外形上很快超越了传统的飞机和直升机。有人把“无人机”这一概念仅仅限定在飞机自身，这种想法并不确切。实际上，无人机由一套完整的系统构成，其中包括地面装置。因此，无人机的名称从“无人驾驶飞行器”（UAV）演变成“无人操作系统”（UAS），最近又改成“飞行器远程驾驶系统”（RPAS），以强调地面操作系统的重要性。

本章将介绍各种形态的无人机，与读者一道打开无人机底座，仔细检视各个组件。

无人机系统

无人机系统包括：

- 飞行器本身；
- 全球卫星定位系统；
- 上行联络（无线电发出的指令）；
- 下行联络（摄像机和照相机发回的信息与飞行数据的传输）。

外形各异的无人机

不论传统飞机式无人机还是直升机式无人机，其组件都包括引擎、电子设备、传输系统、实用载荷。民用无人机最初的诞生，不禁让人联想到飞机问世那个用试验证明一切、波澜壮阔的年代，以及发明家们激情迸发的创造力。设计无人机无需考虑机载飞行员的问题，现代发明家们以天马行空的想象力设计出大小不等、形态各异的无人机。

如同自己的先辈——飞机一样，无人机根据起飞与降落时能够垂直起降还是需要跑

① 皮埃尔－乔治·拉德科艾（Pierre-George Latécoère），法国航空工业先驱。——译者注

道，形成了两大家族：固定机翼无人机（类似飞机）和旋转机翼无人机（类似直升机）。

固定机翼无人机

我们先看看一个世纪以来航空家族的宠儿——飞机。飞机包括以下组成部分：机翼、机身、方向舵和尾翼。固定机翼无人机依靠机翼承受的相对风（相对风是由运动本身产生的风）产生足够的升力飞行。空气动力舵负责控制飞行。固定机翼无人机分为两大类——传统外形的无人机和飞翼无人机。

传统飞机外形无人机

传统外形无人机组件包括机翼、方向舵和尾翼。这种无人机型，尤其是外形酷似滑翔机的无人机，机翼和机身比较纤细，因此续航能力最强，每次飞行距离可以达到 100 公里以上，擅于执行沿直线飞行的观察任务。

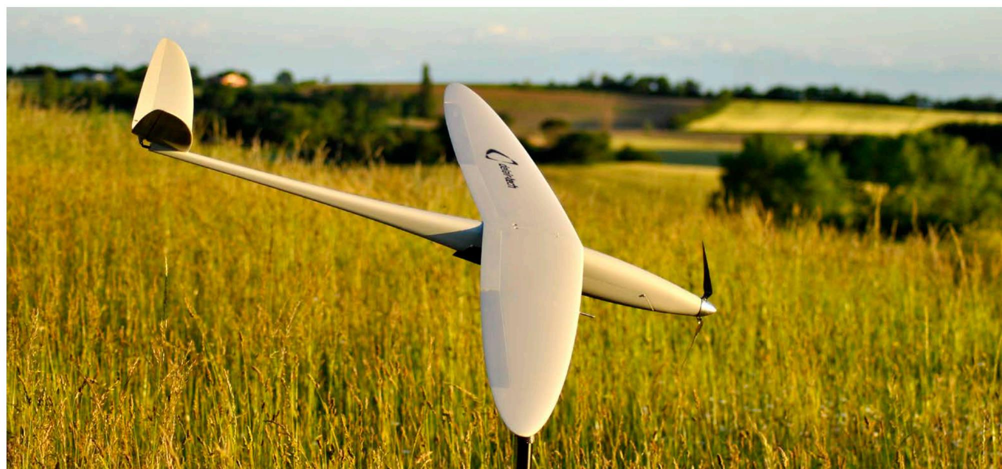


图 2-1　法国德莱尔技术公司的高性能“德莱尔”DT18，重量仅约 2 公斤，可以连续飞行 100 公里

这种无人机尾翼很薄，所以比较脆弱，往往呈现 T 字形（竖直翘起）或者 V 字形。此类无人机属于高机翼无人机（机翼位于机身之上），这种设计让无人机重心降低，增强稳定型。它的另一个优点：在降落时，相对坚固的机身率先着陆，避免比较脆弱的机翼部分损伤。传统飞机外形无人机配备多重控制系统，包括升降舵、舵、副翼，如果其中一项出现故障，飞机仍可以继续飞行。如果升降舵无法使用，则可以用引擎转速代偿：引擎开足功率，飞机上升；引擎功率降低，飞机下降。如果一个或者几个副翼不能使用，可以用方向舵代替。引擎在机身靠前位置，其优势在于可以“吹动”机翼与尾翼，即使在速度较低的情况下，仍保证对无人机的有效控制，并确保一定的升力。不过，这种设计容易让引擎受损，这是无人机脆弱的一环。



图 2-2　德国麦芬奇公司的“天狼星”是一款无线电遥控飞机，在加装了自动驾驶仪和有效荷载后，改造成名为“多重导师”无人机。这种无人机常应用于绘制地图，虽然简单，但是效率极高

此类型无人机擅长直线飞行，只要在几套操作系统（副翼、方向舵、升降舵）上持续施加较弱的力，无人机就能够转弯，但不足之处是转弯半径较长。当飞机侧方遇到风时，这一特点就构成了具有传统飞机外形的无人机的重大缺陷。如果阵风导致无人机偏离航线，需要相当长的时间才能使其回到预定航线上。此类型飞机不可能沿着电网做直角转弯的动作，而飞翼无人机做这种动作时则比较得心应手。

飞翼无人机

飞翼无人机外形简洁，飞翼本身就足够飞行所用。飞翼的形状很稳定，不需要方向舵和尾翼，其导向装置、升降舵（控制高度），以及每侧机翼上的升降副翼能够保证：

- 在倒飞时转弯；
- 在正飞时升降。



图 2-3　从下方仰视法国制造商勒曼航空公司的飞翼无人机，机翼配备实用载荷 GoPro3 摄像头

由于飞翼的厚度通常不足以安装所有组件和实用载荷，飞翼无人机上往往配备短小的机身。

飞翼无人机在转弯时有下降的趋势，为了防止这种情况的发生，机翼末端通常会加上垂直扁平的小翼，即翼尖（wingtip）。



图 2-4　飞行中的“天宝 X100”无人机，拥有机身和飞翼（在机翼末端有翼尖）

飞翼无人机没有方向舵和尾翼，所以很容易收纳在扁平的提箱里。此类无人机易于操作，即使在有阵风的情况下也同样适合沿既定航空路线飞行。飞机厚度较厚，构造坚固。在不寻求长时间续航能力的情况下，飞翼无人机在地图绘制领域里使用广泛，占据统治地位。

表 2-1　两种固定机翼无人机的优缺点比较

类型	优点	缺点
飞机外形无人机	续航能力强 多重操作系统 对实用载荷保护充分、流线型机身	操作不够简便 比较笨重 方向舵和尾翼脆弱
飞翼无人机	操作简便 灵巧 坚固耐用	续航能力弱 供安装组件和实用载荷的空间小 没有多重操作系统

旋转机翼无人机

旋转机翼能够把空气向下方吹动从而产生升力，旋转机翼无人机有两种类型：传统的可变桨距无人直升机，以及新近出现且倍受欢迎的固定桨距多旋翼无人机。

可变桨距无人直升机

在电动推进装置出现之前，旋转机翼无人机领域始终是可变桨距无人机的天下，通过改变主螺旋桨两片桨叶之间的桨距控制飞机起飞降落，依靠调整主螺旋桨的一个桨叶控制飞机的俯仰、侧摆。

可变桨距无人直升机分成两种类型：配备尾部螺旋桨的传统直升机式无人机和不需要尾部螺旋桨的对转双螺旋桨无人机。

配备尾部螺旋桨的传统直升机型无人机

此类无人直升机由带引擎的机身、主螺旋桨和尾部螺旋桨组成。

尾部螺旋桨的作用是抵消主螺旋桨产生的反作用力。为了理解这一原理，可以联想一下用电钻钻孔：电钻一经开动，即可产生与钻头反向转动的趋势。直升机也面临相似的作用力和反作用力问题：当螺旋桨叶开始转动的时候，直升机会反向转动，尾部螺旋桨的作用就是抵消这种反作用力，并控制无人直升机朝立轴方向运动。



图 2-5　法国勘测直升机公司的“直升机 4 号”，配有两台排量 29 立方厘米的热力引擎，最大总重：30 公斤，实用载荷：10 公斤，续航时间：1 小时 30 分

主螺旋桨和尾部螺旋桨安装的都是可变桨距桨叶。不论飞行速度如何，引擎单位时间转数不变，随着速度变化的是桨距。主螺旋桨和尾部螺旋桨的单位时间转数不同，因此需要安装分离减速器。直升机的旋翼有一套转盘系统，能够依据转盘周长的比例，同时改变两个螺旋桨的桨距，也可以只改变其中一个螺旋桨的桨距。引擎通过皮带或传输轴带动尾部螺旋桨运动。尾部螺旋桨也是可变桨距螺旋桨。

传输轴、皮带、齿轮、可变桨距系统……一架直升机结构复杂，拥有很多传动零件。各个零件的活动会产生震动，所以，为了保护电子仪器免受影响，必须进行细致保养，包括上油、检查螺丝的松紧、调整攻角、在齿轮出现严重损坏之前及时更换等。

操纵直升机式无人机对操作者要求很高。机身在逆风飞行时如同风向标一样，自然而然地顺着风吹的方向移动，侧面刮来的风使尾部螺旋桨效率降低。在坠机时，桨叶会激射而出，非常危险。而在这种无人机上无法安装紧急降落伞，因为桨叶会把伞绳割断。

体型巨大（20 公斤以上）和续航时间长（超过 1 小时）的无人机中有不少是直升机式无人机。不过，在民用无人机的大家族里，传统型无人直升机所占比例很小，原因很简单：这种无人机的动力由一台或几台热力引擎提供。



图 2-6 “西贝尔 X100”，最大总重：200 公斤，实用载荷：50 公斤，续航时间：6 小时

<u>对转双螺旋桨无人机</u>

这种无人机是传统直升机式无人机的变型，配备两个可变桨距旋翼，彼此同轴反向旋转，抵消相互之间的作用力。这种设计的优点在于可以无需机身，令结构更加紧凑。与传统的直升机式无人机一样，这种飞机仅限于大型无人机，可由热力引擎驱动，在现有无人机家族中比重较小。



图 2-7 “信息创 IT180”对转双螺旋桨无人机，最大总重：19 公斤，实用载荷：5 公斤，续航时间：1 小时

固定桨距旋翼：多旋翼无人机

多旋翼无人机出现在 21 世纪初，依靠对若干旋翼的速度调整实现无人机的悬停、前进动作。引擎和直接安装的螺旋桨是唯一可以活动的部件。使用这种无人机需要对旋翼旋转进行精准的同步调制，只有电动机才能完成这一任务。

多旋翼无人机的底架由几条支撑杆和一个中心部分组成，外形如同蜘蛛。支撑杆末端支撑引擎和螺旋桨。这些支杆是中空的细管，由轻质材料（碳纤维、玻璃纤维、铝纤维）制成，细管的截面可以是正方形或圆形。截面是圆形的细管，需要更重的固定装置。但是，由于这种细管在受到撞击时，部件之间即便出现一定间隙，仍能正常工作，所以，一旦出现坠机的情况，截面呈圆形的支撑杆让无人机结构更耐撞击。



图 2-8 用层压技术制造的无人机支臂碳管。下方是无人机圆形横截面机臂所需的“卡箍”（clamp）

多旋翼无人机底架由碳板和垫片构成，形成分为几层的罩壳，容纳所有重要组件，包括无线电接收器、遥测发射器、视频发射器、机载电脑、传感器、飞行用电池、吊舱、实用载荷、配电器、电子稳定控制系统（ESC）。所有组件都可以通过螺钉、螺栓组装起来。这一结构可塑性极强，可以根据需要任意增加层数而不会引起太大的空气动力学问题。因此，悬停飞行是多旋翼无人机的一大特点。高级多旋翼无人机会采用穹顶式盖帽，起到防水和防尘作用，同时使飞机更美观，从空气动力学角度看，也更加科学合理。当然，这种情况下，无人机负载会相应增加。

一架无人机配备 3 台、4 台、6 台甚至 8 台引擎……这些念头都不再是幻想，只要在自动驾驶仪程序中调整管理的引擎数量就可以实现！多台引擎能够保证更大的升力。因此，无人机在使用标准引擎和螺旋桨的情况下，能够承担更大的实用载荷。理论上，多台引擎还可以增加稳定性、增强底架强度、提高自动驾驶质量，同时无人机的惯性也会增大。可拆解部件减少，降低了发生故障的风险，所以，引擎数量的增加还提高了安全性：六旋翼无人机和八旋翼无人机在一台引擎缺失的情况下仍能继续飞行，因为其他引擎在某种程度上可以起到代偿作用。

最优秀的专业多旋翼无人机续航时间通常不超过 30 分钟，而大多数多旋翼无人机的

续航时间在 10 分钟左右。

四旋翼无人机



图 2-9 “三角洲 H 型”四旋翼无人机，法国三角洲无人机公司生产，重 4 公斤

四旋翼无人机是最受欢迎的娱乐用无人机，良好的操作性能够让无人机做出各种花样动作，当然，要在没有装配实用载荷的情况下。体型大的四旋翼无人机也会用于专业领域。



图 2-10 一架专业四旋翼无人机 MD4-1000，由德国迷你无人机公司生产，配备防护盖帽

六旋翼无人机

六旋翼无人机（6 台引擎、6 条机臂）备受摄影师的钟爱。因为，搭载少于 1 公斤的实用载荷时，这种无人机不占用太大的空间，而新一代全帧反光相机的重量恰好不足 1 公斤。



图 2-11 “电影明星 6”六旋翼无人机，美国自由飞翔公司生产，重 4 公斤，实用载荷 1 公斤

八旋翼无人机

这种无人机是专业用“重型运输机”，其实用载荷可达 2 公斤，但是其体积巨大而笨重，不太讨人喜欢。回收执行完任务的八旋翼无人机后，很难将其直接装进汽车的后备箱中，只能把无人机拆开放入。



图 2-12 “多旋翼 G4”八旋翼无人机，无人机服务公司生产

同轴多引擎无人机

如何在不增大体积的条件下使无人机马力更加强劲？答案很简单：把两台引擎叠放。这种方法适用于四旋翼无人机和 Y 形无人机（三臂无人机）。



图 2-13　无人机爱好者自制的 Y 形无人机，如同改装汽车一样

这种引擎安装方式与传统方式相比，会导致功率下降约 20%，不过非常节省空间。



图 2-14　“狐狸 – C8”八引擎同轴无人机，奥尼克斯星公司生产，配备热成像摄影机

H 形无人机

H 形多旋翼无人机的引擎沿两根横杆安装，横杆分开，保证实用载荷前方从上到下向的视野开阔。机身呈长方形。实用载荷装在机身末端，如果把实用载荷移位，起到平衡配重作用的飞行电池也要改变安装位置，做出相应调整。



图 2-15　德国上升科技公司制造的“猎鹰 8”无人机，总重不到 3 公斤

旋翼的数量和位置不会从根本上改变飞行方式，受到影响的仅仅是视觉方面。由于没有机尾和机身，不容易分清楚哪边是无人机的前方。所以，无人机臂前方通常装饰鲜艳的色彩，或者装有发光二极管（LED）灯，这样，在光线微弱的情况下才容易看清无人机。另外，还可以设定程序，在无人机到达航路点或在电池电量耗尽时，让发光二极管灯不断闪烁。

由于多旋翼无人机操作简单、价格低廉，其数量占现有无人机总量的 80% 左右。

其他设计：柔性机翼无人机、扑翼式无人机、可转化无人机

下面将介绍一些具有独到设计理念的无人机，它们在无人机世界的特定市场中，各自占有一席之地。

柔性机翼无人机

柔性机翼无人机是配备吊舱的滑翔伞，吊舱搭载实用载荷。在达到一定速度之后，机翼鼓风，依据空气动力学原理，无人机获得升力。这种无人机的驾驶方法简单：只要拉拽连着机翼末端的吊伞绳就可以转向，释放气体让无人机上升，切断气体供应让无人机下降。柔性机翼无人机不会坠机：引擎出现故障时，无人机将像滑翔伞一样下降。这种无人机飞行速度较慢，不论引擎转速如何，飞行始终保持速度稳定，不过，在遇到刮风或者上升气流时会出现问题。



图 2-16　滑翔伞还是无人机？

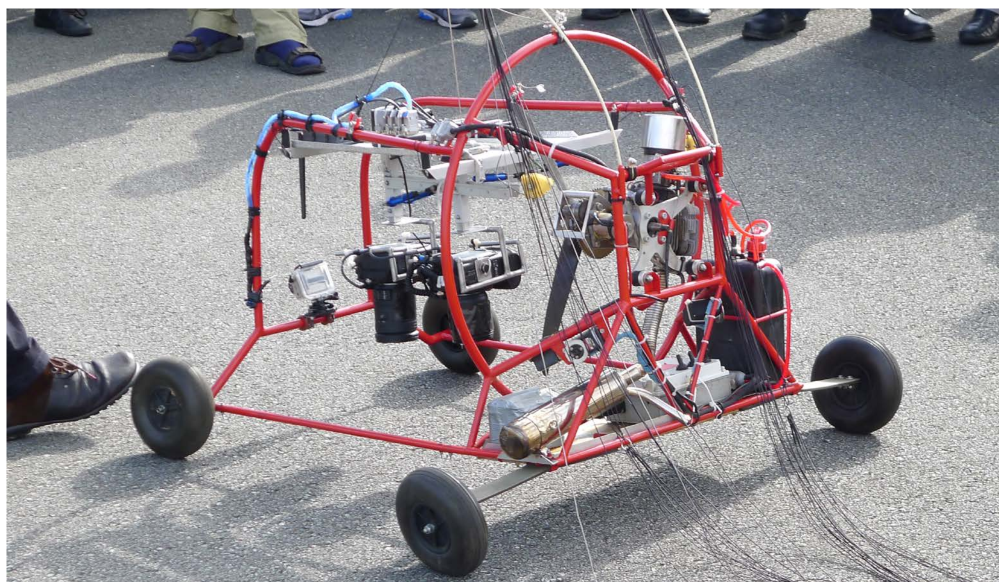


图 2-17　滑翔伞无人机的吊舱

这种无人机适用于要求在空中几近悬停的任务，如作为转播的中继站和观察点……由于运载能力强、起飞距离短，柔性机翼无人机还可用于运送人道主义物资。

扑翼式无人机

能够扑打的机翼！这种奇思妙想来自我们儿时的橡胶电动玩具。

如果需要把无人机伪装成鸟类，这种飞行驱动方式必不可少：

- 把外形酷似猛禽的无人机当作飞行“稻草人”，驱散飞机场附近的鸟类，防止对飞机造成危险；
- 垂直起降，不必担心旋翼伤人；
- 低调、隐蔽地执行监视任务。



图 2-18　荷兰简洁飞行方案公司的扑翼式“猎隼”无人机

可转化无人机

像直升机一样垂直起降，像飞机一样远距离快速飞行——波音 V22“鱼鹰”无人机成功赢得挑战，现在正处于试验飞行阶段。 无人机的引擎可完全倾转，让设计变得更复杂、繁重，而且很难操作。目前，这种无人机在民用无人机领域只能用于娱乐。

德国迷你无人机公司设计了一款 MD4 3000 四旋翼无人机，或许还不能完全符合“可转化”的标准，但飞机在前进过程中能够依据空气动力学提供一定的升力，令续航时间相应提高。



图 2-19　结合多旋翼无人机与飞翼无人机特征，德国飞行机器公司生产的可转化无人机“鸟瞰”



图 2-20　该无人机机身的扁平外形便于在前进过程中产生升力

表 2-2　各种旋翼无人机对比

种类	优点	缺点
传统直升机式	- 性能优良 - 可以自动旋转 - 易操作 - 续航时间长（采用热力发动机的情况下）	- 复杂 - 体型大 - 旋翼容易导致危险
多旋翼式	- 简单、价格低廉 - 可安装降落伞	- 电动机续航时间短
对转螺旋桨式	- 优点和传统直升机式无人机相同，且体积小、灵活	- 与传统直升机式无人机缺点相同
扑翼式	- 不存在螺旋桨导致的危险 - 可以伪装成鸟类	- 不坚固 - 复杂 - 携带实用载荷的能力差
可转化式	- 理论上续航能力强，能够垂直起飞	- 复杂 - 属于处在试验阶段的民用无人机

无人机为何如此形态各异?

正如你所见，无人机多种多样，外形千变万化。为什么会出现这种情况？答案很简单，因为不同的无人机要尽可能满足不同的需求，同时要尽量延长续航时间，增加实用载荷。

满足起飞地点和飞行计划的要求

如果起飞地点存在障碍物，那么无人机需要垂直起降，因此，应该装备旋翼。如果起飞点开阔、没有障碍物，那么采用固定机翼无人机即可。

飞行距离、海拔高度、速度、天气状况等条件都会要求无人机有符合空气动力学的特殊外形。固定机翼无人机续航时间是旋翼无人机的 3 倍，而且速度更快。但这种飞机能携带的实用载荷有限，由于空气动力学的要求，其实用载荷的体积不能太大。多旋翼无人机主要用于需要空中悬停的飞行任务，其携带实用载荷重量不像固定机翼无人机那样受到各种限制。

携带实用载荷

实用载荷量直接影响无人机的大小。无人机必须承担实用载荷的重量，而且，对实用载荷占据空间大、不够坚固，甚至消耗电力的问题也要统统包容。实用载荷一般不能超过总重量的 20%。比如，如果用小型相机拍照，不到 2 公斤的四旋翼无人机就能够胜任。如果用高清的大型反射镜头拍照，比如佳能 5D，则需要使用 7 到 8 公斤的多旋翼无人机。

无人机还应确保实用载荷的视野正对任务要求的方向（垂直、水平、侧面）。比如，一台机载照相机可以放在机头里或者机身下。在厚度更大的飞翼无人机上，可以把相机安置在厚厚的飞翼里。无人机制造商绞尽脑汁，采取各种设计方案，保证无人机降落时地面不会遮挡相机镜头。大疆创新科技有限公司在 S1000 型无人机上安装了能够伸缩的照相机，自由飞翔公司则用三轴吊舱加固照相机。对于固定机翼无人机来说，一种更加彻底的方法就是去掉照相机，这样飞机就可以用腹部着陆。

易于维修保养

常规大小的飞机能够连续飞行数小时。而无人机则常常在不易于飞行的地区使用，而且受阵风影响很大，加上远程驾驶、自动驾驶经常导致无人机在降落时碰撞不断……在使用过程中，无人机螺旋桨碰到地面、机翼翼尖或天线折断的情况时有发生。所以，无人机在设计上应该易于维修保养，保证无人机随时可用。

对于一些小型无人机，如对于美国门翼公司和法国勒曼航空公司的产品来说，经常损坏的部件就是机翼，机翼成了简单的消耗品。宝贵的精密部件（自动驾驶仪、传感器、电池、实用载荷）可以回收，而且，把这些部件安装在新无人机底架上的操作也非常简单。所有部件都应该易于清洗，因为决不允许无人机带着泥巴起飞，更要杜绝阻塞传感器的情况发生。

携带便捷、易于启动

无人机的大部分时光都是在地面和交通工具上度过的。一架多旋翼无人机，尤其是八旋翼无人直升机可能会非常笨重、占用空间较大（翼展 1 米以上，高 40 厘米）。有些无人机非常易于运输，配备可折叠旋翼臂、可拆除旋翼臂、可拆装机翼。



图 2-21　配备可拆装机翼的“传感飞行－电蜜蜂”无人机

减少给环境带来的危害

无人机飞行时存在坠机的危险，可能带来严重的人员伤害与财产损失。无人机机体越轻巧，或者制造材料减震能力越强，坠机对环境造成的影响就越小。越来越多的多旋翼无人机的螺旋桨采用流线型，目的就是降低螺旋桨毁坏的危险。



图 2-22　Aibotix X6 无人机出于安全考虑，采用流线式螺旋桨

资金限制

卓越的设计必然是长期科研探索的成果，需要高端人才与先进程序的支持；优异性能和量身设计必然需要高价投入。相反，设计粗糙、零部件随手可得、制造材料平淡无奇的

无人机一定性能不佳，而且粗大笨重，但购买和使用价格低廉。

如今，无人机的性能仍然有限，需要根据客户的特殊需求量身定制。能够满足各种不同需要的全能无人机在短期内不会出现，不知未来何种设计能在无人机市场上一枝独秀……

无人机主要组件

现在，让我们打开无人机底座，看一看主要组件。机载系统最重要的部分是自动驾驶仪和传感器，其次是发动机装置、执行器、传导装置。

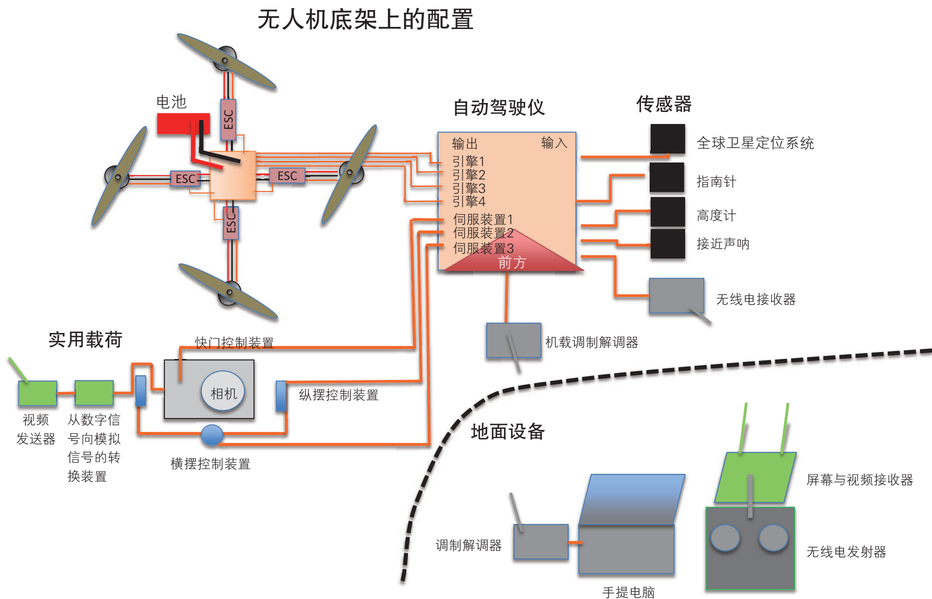


图 2-23　一架四旋翼无人机的功能图解

自动驾驶仪

自动驾驶仪相当于无人机的神经中枢，不但能保证飞机的基本稳定性（在此情况下，可以把自动驾驶仪称为“控制器”），甚至可以自动巡航。如果没有自动驾驶仪，固定机翼无人机就是一架普通的“遥控飞机”；即使对于资深操控人员来说，也无法控制一架没有自动驾驶仪的多旋翼无人机。如今，自动驾驶仪十分精巧，可以放在掌心之中，足以显现出近二十几年来微型化技术与机器人技术可靠性的长足发展。

从外观看来，自动驾驶仪就是一块或两块印制电路板，每块电路板具备前文提到的功能。自动驾驶仪包括一个主信息处理器、若干传感器、记忆卡，以及众多界面系统，其中

包括航行必不可少的全球卫星定位系统。全球卫星定位系统处于无线接收器和执行器之间，牢牢地固定在无人机底座上，尽可能与重心重合。

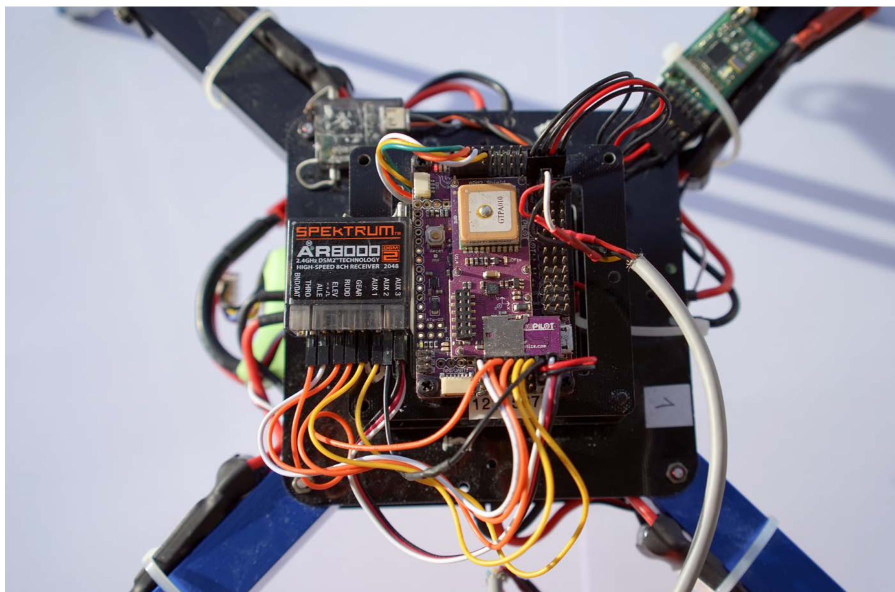


图 2-24　自动驾驶仪及其连接电路。中间的紫色部分是 3DR 公司生产的开源高级电源管理 APM 2.0 自动驾驶仪；下方，是来自 Spektrum 接收器的电线，Spektrum 接收器是自动驾驶仪的输入装置；上方，是和引擎相连的输出装置

通过一套包含所有控制飞行信息数据的软件编程，可以操控自动驾驶仪。

飞行传感器

为了确保无人机飞行稳定，操控人员需要与普通机飞行员一样掌握必要数据。传感器接收所有加速度、速度、高度、倾斜度的数据，并将其转化为电流传输给机上的计算器。随着微电子技术的进步，部分传感器的大小仅为几毫米。无人机飞行必备如下几种传感器。

- 压力传感器，控制飞行高度，更准确地说是无人机相对于出发点的高度。这种传感器的运行原理为：高度每升高 30 米，大气压下降千分之一。
- 加速度仪，实时测量无人机倾斜度，并控制飞行高度。
- 陀螺仪，共有 3 个（每条轴线上一个），测量每条轴线上的旋转角速度。陀螺仪对于确定无人机的空中位置，以及平衡外部气流干扰非常必要。陀螺仪对温度很敏感，因此，每次系统启动都会自动校准。
- 电子罗盘，沿着 3 条正交轴线测量地磁场强度。罗盘测算北磁极与地理北极之间的磁偏角后，对磁偏角进行补偿，并指出正确航向。

其他传感器以及可选组件

- 空气速度传感器（仅为飞机配置）测量飞机相对于空气的速度，而非相对于地面的速度。工作原理是：计算出空气进入一个被称为“皮托管”（Pitot Tube）的小管子而导致的静压与动压的压力差。这根管子要放置在面对相对风的方向，比如一侧机翼的前缘或机身前方。和正常体积的飞机一样，无人机在飞行前一定要检查皮托管，确保没有堵塞，否则会致使数据错误，在飞行过程中出现坠机事故。

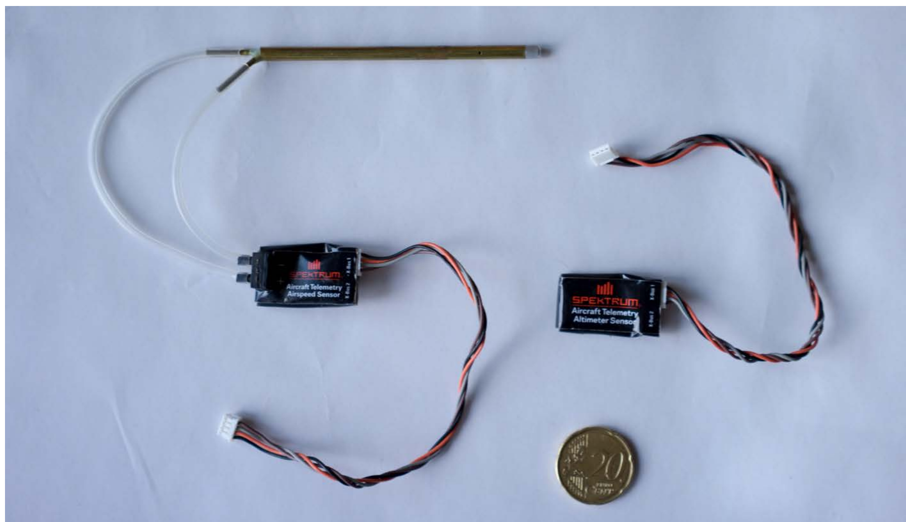


图 2-25　左侧是和铜质皮托管相连的空气速度传感器，右侧是高度传感器。两个传感器大小与方糖相似



图 2-26　“天宝 X100”无人机翼前缘的皮托管

- 电压表和电流表测量飞行电池状态和所消耗的能量。
- 全球卫星定位系统组件对于自动飞行和正常飞行都必不可少，因为它可以从经度、纬度、高度定位无人机的地理位置。根据信号质量高低和参与定位的卫星数量，其定位精确度最高可达 10 米。全球卫星定位系统还可以计算路径与速度。该系统的传感器必须安装在有开阔视野的高空中，因此，要固定在无人机的最高点。

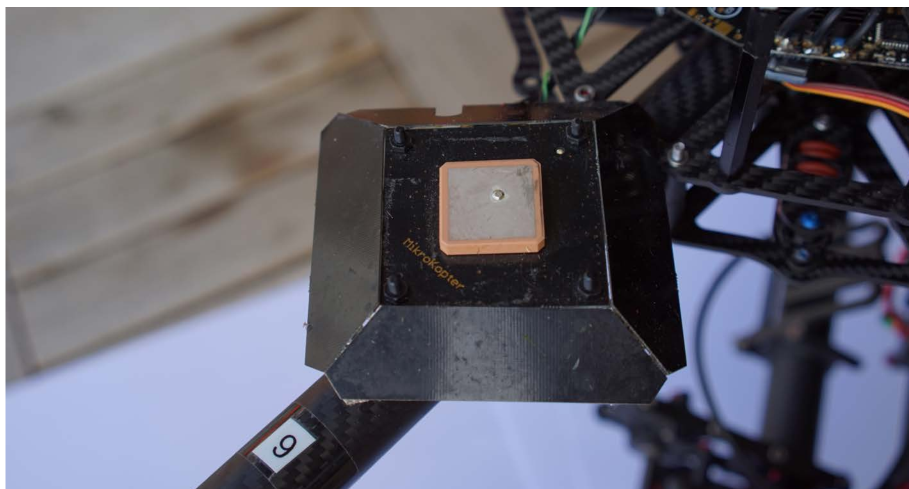


图 2-27　德国微型飞行器公司无人机全球卫星定位系统组件

- 测量距离的传感器（声呐或激光）和汽车倒车雷达拥有相似的工作原理：发射超声波，依据回声测量距离，误差为几厘米。通常情况下，其测量距离较短（大约 10 米左右）。
- 视频传感器的作用是协助稳定无人机而非录制视频（摄像机属于实用载荷）。视频传感器可以检测到相对于视频图像的移动，比如“鹦鹉 AR”无人机就配备了这种传感器。

计算器

计算器也被称为处理器，接收来自传感器的数据，与预定数据相比较后，向驾驶系统传输命令。

存储器

在读取功能方面，存储器里储存飞行程序、标准调试数据，有时也储存判定标准。

在写入功能方面，存储器可以记录飞行数据，通常记录在小型安全数码卡（SD 卡）上——这是无人机的黑匣子。有些数据在飞行过程中将不断传回地面站，并存储于其中。这一配置对于弄清坠机原因用处很大，即使在没有找到坠毁无人机的情况下依然奏效。

执行器

执行器把自动驾驶仪的命令进行转化，指挥固定机翼无人机操纵舵或实用载荷吊舱的行动。



图 2-28　副翼舵：可以推断，嵌入副翼中的伺服电动机呈长方形

伺服电动机体积各异：从半块方糖大小到一块肥皂大小。伺服电动机有两个分类标准：转速（比如，一台快速伺服电动机用 0.13 秒旋转 60 度）；以及负载（以公斤为单位，比如，标准伺服电动机负载相当于 4 公斤），负载与要求提供的机械力相符。自动驾驶仪始终要与伺服电动机协同工作，尤其为了稳定无人机和实用载荷。因此，脆弱的伺服电动机需要经常更换。伺服电动机以最大功率工作时会大幅消耗电量，导致机上电路电压出现暴跌的危险，甚至引起故障，致使无人机迅速下降。有一个解决方法是，用独立电路为自动驾驶仪供电。

联络系统

联络系统是保证任务圆满完成必不可少的组成部分，无人机配备双向联络系统（上行系统与下行系统）。

无线电接收器

控制联络指无人机接收地面“向左转”“旋转摄像机”之类的命令。一台发射器与一台接收器搭配控制无人机。因此，无人机的接收器只听从与自己配对的发射器的命令，对其他可能造成干扰的命令“充耳不闻”。

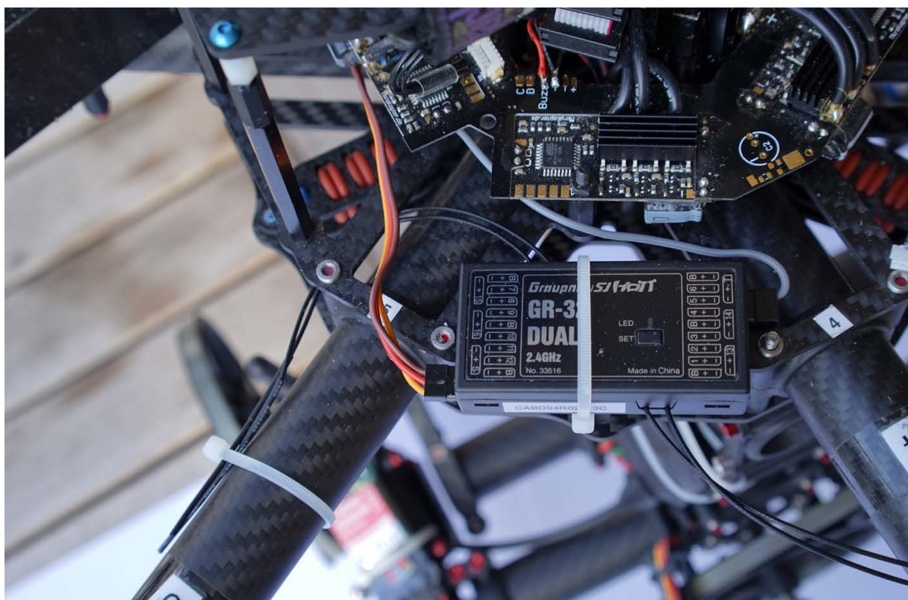


图 2-29　“格洛普纳 GR 32”无线电接收器：借助自动驾驶仪的多路传送技术，16 条通道经过唯一的黄色电线（灰色电线负责遥测功能）

调制解调器

机载调制解调器是无线网络的发射器 / 接收器，把无人机的地理位置和传感器接收的数据传送给地面上与电脑相连接的另一个调制解调器。机载调制解调器还可以接收地面发出的命令。

视频发射器

为了取镜拍摄相片与视频，无人机配备下行视频连接：信号源最好直接来自照相机，这样一来，地面上的操控人员可以看到图像信息，如同亲眼透过无人机机载照相机机身看到的信息一样。中级或高级照相机装配的高清晰多媒体接口（HDMI）负责采制信号，传输给视频发射器。如果采用数字连接，当无人机飞远的时候，图像会从地面控制台的屏幕上突然消失，过一段时间后再重新出现。如果在发送前把信号转换成模拟信号，信号会不断减弱。在法国，一架无人机获准发送的最大视频传输功率是 25 兆瓦。如果没有配备特殊天线，这种功率能够传送的有效范围不超过 300 米。2014 年，诸如大疆创新 DJI Light 一类的数字放大器进入市场，其有效范围可达 1 公里。

机动化组件

机动化组件包括飞行电池、功率箱、控制器、引擎、螺旋桨。一架 4 公斤重的六旋翼无人机在上升时可以消耗 800 瓦电力，需要可靠的电力供给。

飞行电池

机动化组件是消耗能源的主要部分，决定了飞行电池的电压和电量。如果无人机上配备多个不同电压的电路，通过加入变压器，用一个电池为所有电路供电或许是最佳选择，因为这种方法更简便，而且和用多个电池供电的方法相比，能减轻无人机的重量。这里必须使用能量密度最大的电池，而且此类电池要能承受高放电率。面对这些苛刻要求，长方形聚合锂电池往往会脱颖而出。



图 2-30　几款在无人机上使用的标准电池。电池外壳上标明了电池的电量、电压和放电系数。根据电池大小不同，插销颜色（黄色、红色、黑色）也会有相应的差别



图 2-31　为一架迷你无人机公司生产的无人机量身定做的电池

划分电池种类的标准如下。

- 电压永远是 4 伏的倍数（4 伏是电池的单位电压），所以，一个电压 12 伏的电池包含 3 个单位电池。
- 电量（单位是毫安 / 小时，可用 mAh 表示）。
- 放电系数指的是在不损伤电池的前提下充电或放电的最大比率：比如，1C 指储存的所有能量可以在 1 小时内释放（低强度）。考虑到能量消耗高峰，对于一架多旋翼无人机来说，至少需要 20C，即能量可以保证放电 3 分钟。

无刷逆变器

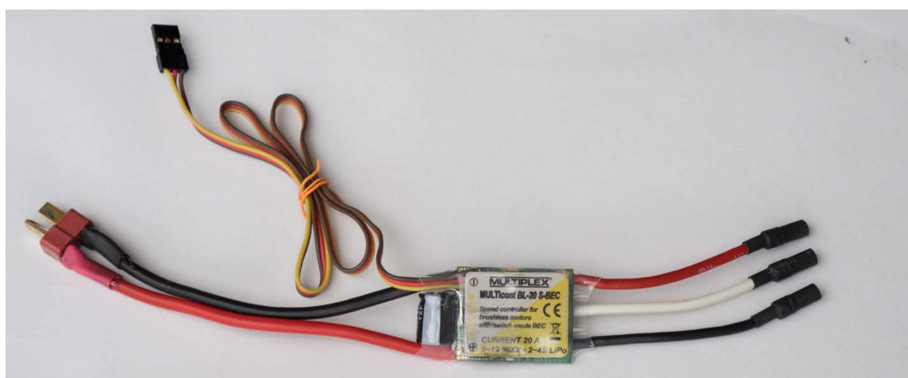


图 2-32　标准无刷逆变器。左侧的红色插头与飞行电池相连；右侧的三根电线与引擎相连，输送交流电；上方左侧的伺服插头插在自动驾驶仪上，提供电压为 5 伏的弱电流

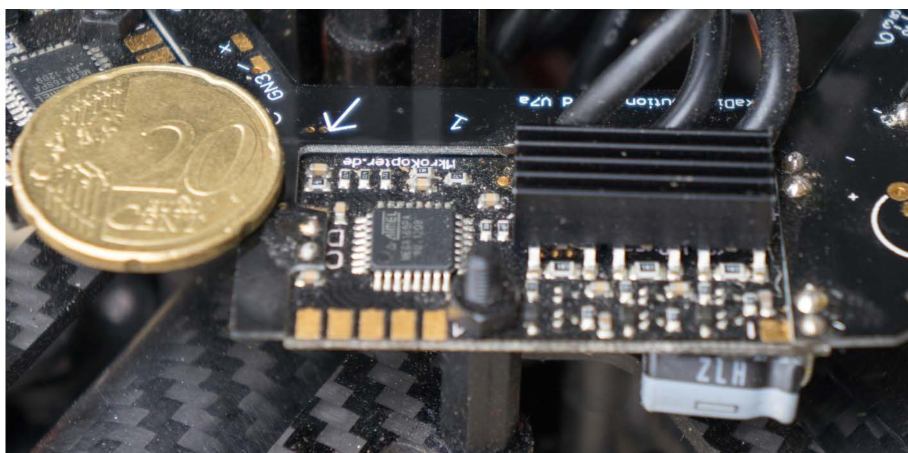


图 2-33　德国微型飞行器公司的无刷逆变器。这种特别的逆变器安装在有嵌入电路的电路板上

无刷逆变器把直流电变成有特定脉冲的交流电，以便让无刷电动机运行。逆变器的体积应该根据所能承受电流强度进行调整。决定电流强度的因素包括引擎、无人机体积和螺旋桨桨距。逆变器会发热。商业逆变器可提供电压为 5 伏的弱强度输出电流，足够为接收器和三四个小型伺服装置供电。

无刷电动机

没有无刷电动机就没有多旋翼无人机，无刷电动机不需要煤炭就可以向旋翼传递能量。电动机旋转，线圈静止，这样一来，除了轴的部分之外，其他部分摩擦力小，部件磨损程度轻微。

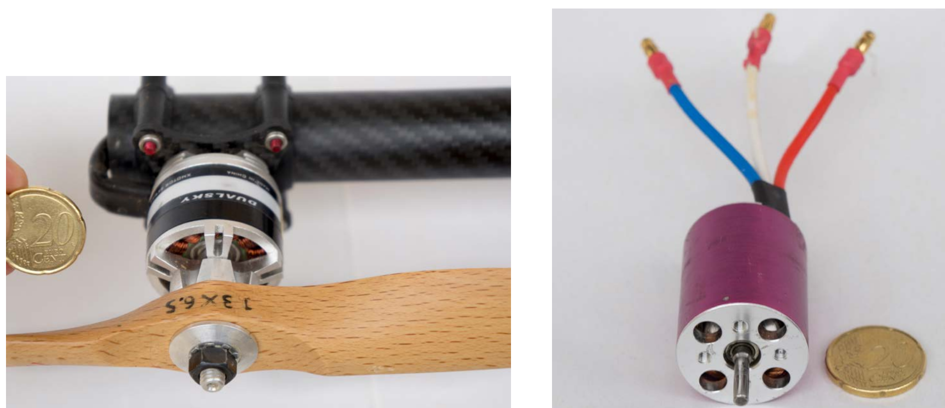


图 2-34　旋转转子引擎（左图）和固定转子引擎（右图）

无刷电动机的效率约 90%，而且不需要维护，甚至可以在水下运转。无刷电动机有两种类型：旋转转子引擎和固定转子引擎。旋转转子引擎使用更为广泛，提供合适的力偶；而固定转子引擎可以安装在机身之中。

无刷电动机分类

无刷电动机根据 KV 值进行分类。“KV 值”指的是电动机每分钟在每伏电压作用下的转动次数。比如，一台标准电机有 4 个电池单位，每个电池单位电压 3.7 伏。如果 KV 值是 900，那么该电机每分钟转动次数为 14.8×900=13 320，即 220 转 / 秒。

螺旋桨

无人机的螺旋桨相当于汽车的轮胎，是需要随时检查的易损耗部件。多旋翼无人机的旋翼成对运行，在一对旋翼中，一个螺旋桨顺时针旋转，另一个逆时针旋转。所以，要按

照旋翼旋转方向安装螺旋桨，否则无人机起飞时会原地旋转。

制作螺旋桨所用材料按照价格和性能递增的顺序排列如下：尼龙（塑料）、木材（通常选用山毛榉）、碳。航空领域通常使用的金属材料往往用于大型无人机，比如法国信息创公司的无人机。螺旋桨可以是固定螺旋桨，也可以是防止折断的可折叠螺旋桨。



图 2-35　左侧，顺时针旋转的螺旋桨，用碳（黑色）、山毛榉（米色）或尼龙（灰色）制成；右侧，逆时针旋转的螺旋桨（桨叶相反）

螺旋桨的分类

螺旋桨根据“尺寸 × 桨距”分类，尺寸指的是螺旋桨以英寸（1 英寸 = 2.54 厘米）为单位的长度，桨距指的是以英寸为单位螺旋桨每转一周在水平面上经过的距离。比如：

- 13.5 英寸 × 4 英寸应用于 4 公斤重六旋翼无人机；
- 10 英寸 × 4.7 英寸应用于 1 公斤重四旋翼无人机。

即使引擎转速很慢，螺旋桨还是会严重受损。在更换程序或者电子元件后，测试引擎的时候一定要取下螺旋桨。必须时刻记住：只要接通电源，引擎突然启动，就有可能出现意外。



图 2-36 “天宝 X100”无人机的推进螺旋桨，可折叠设计，防止降落时受损

在无人机上如何配置组件？

无人机机载组件一定要合理配置，因为它们会互相影响。

很多组件会产生热，所以，一定要有足够的开口保证通风顺畅。必要时，应该把视频发射器等容易产热的部件直接安装到螺旋桨产生气流的部位，把螺旋桨作为高效的风扇使用。

移动部件（螺旋桨和引擎）产生震动，而加速计、指南针、声呐等传感器对震动非常敏感。震动问题要从源头（比如平衡螺旋桨）处理，或者把传感器安装在橡胶、弹簧或减震泡沫塑料上加以保护。电路，尤其是电流强度大的直流电路会产生磁场，指南针会受到影响，所以要尽可能把指南针安装到远处。

实用载荷

为了说明什么是实用载荷，我们可以将其看成飞机上的乘客：电子设备、照相机、摄像机、热传感器等都属于实用载荷。选用哪种仪器直接取决于执行任务的种类。有时无人机还会使用到热摄像机、激光雷达（Lidar）、辐射探测器等。体积小、重量轻并受到妥善保护的仪器都可以放置在无人机上。

作为实用载荷的相机盘点



图 2-37　实用载荷：照相机与摄像机

- 理光 GR 照相机（左上方）。
- 索尼 CX730 摄像机（中间）。
- 全帧相机 A7R（右侧），伺服线和 LED 灯相连，目的是能够远程拍摄照片。
- GoPro 相机（左下方）。

固定机翼无人机上的实用载荷

在飞机式无人机和飞翼无人机中，照相机往往隐藏在机身中，人们仅能从机身下方的开口推测照相机的存在。

旋翼无人机的实用载荷

与固定机翼无人机相比，旋翼无人机能够承担更大的实用载荷，而且在空气动力学方面受到的限制较少。旋翼无人机可以携带吊舱，保证对实用载荷的控制，确保其稳定性。操控人员通过操作遥控器上的手柄或滚轮，调整两或三条轴线，进而控制吊舱。同时，根据从自动驾驶仪传来的信息，无人机可以调整机身姿势，保持平衡。传统伺服装置可以作为吊舱的执行器，如果用橡胶带加固伺服装置，还能让吊舱的动作更加顺畅。2012 年，为吊舱配备的无刷电动机问世，保证吊舱更加平稳，不会有骤然停顿的情况，安装后负载只会略微增加。



图 2-38　左侧是天空革新公司研发的“传感飞行 – 电蜜蜂”无人机，装备近距离红外线传感器，应用于农业领域。右侧是“天宝 X100”无人机以及醒目的理光 GRD 镜头

理想的情况是，把实用载荷放在无人机的重心上，这样，实用载荷的变化不会引起无人机失衡。多旋翼无人机比固定机翼无人机更能适应重心移动的情况，因为其旋翼可以对重心偏移进行校正。

多旋翼无人机的实用载荷几乎总是放置在正中的吊舱里，位于螺旋桨下方。某些任务要求能看到无人机上方的情况，比如探察桥梁底面状况，此时，可以把实用载荷放置在无人机的高处，即螺旋桨上方。



图 2-39　配备无刷电动机的吊舱侧面和中央

地面设施

如果没有地面控制设施和接收飞行数据、实用载荷数据的设施，无人机根本无法完成任务。有些无人机还配有发射和回收装置。



图 2-40 “盒子”型遥控器，拇指放在上方；这种遥控器结构紧凑，但操作不够舒适

控制设施

控制设施包含在遥控器中，有时还搭配电脑和调制解调器。

如果通过精确手动操作飞行，带有手柄和断路器的遥控器必不可少。遥控器有两种类型：“盒子”型遥控器与“书桌”型遥控器。

我们可以为遥控器编程。遥控器记录了专门属于每一架无人机的参数（伺服装置冲程的反转与长度、断路器的选择、平衡控制）。安全防护措施还可防止把一架无人机的参数用于另一架无人机。



图 2-41 “书桌”型遥控器，更加占用空间，但对于专业应用来说操作，更加舒适，而且还带有遥测屏幕和视频屏幕

一台遥控器分为 3 部分。

- 2 个带有弹簧、能够自动回到中立位置的手柄。
- 按钮、两三个位置的断路器、滚轮：用于控制实用载荷或者改变飞行模式。
- 控制屏幕：显示遥控器状态信息，并通过下行连接显示机上传感器的信息。与遥测装置相连的分层遥控器在 2010 年问世。

为了完成一项任务，无人机需要具备一定数量的功能，被称作“通道”。

- 至少需要 4 条通道才可以用手柄在 4 条轴线上控制无人机。
- 至少需要 2 条通道才可以开启基本飞行控制模式：定高模式（Altitude Hold）、悬停模式（Position Hold）、常规模式、自动飞行模式；通过有两三个位置的断路器决定启用哪种模式。
- 至少要有 2 条通道才可以控制实用载荷：启动快门、控制垂直轴线上的活动。

因此，遥控器总共至少需要 8 条通道。对专业应用来说，通道数量越多，操作越舒适，

安全度越高。

- 额外飞行模式需要 4 条通道，如自动起飞、自动降落、保持飞行方向等。
- 1 到 2 条通道用来推近或拉远镜头，选择拍照模式或录像模式。电影工作者还希望在控制飞行的同时，在 3 条轴线上控制摄影机，为了达到这一目的，还需要额外 2 条通道。

一些高端遥控器配备 18 条通道。

如此之多的手柄和按钮令控制任务变得非常复杂。操控人员在屏幕上校正数据或搜寻信息时，可能会一时没有注意无人机，不小心按错按钮。最新的遥控器配备声音提示功能，提醒操控人员正在使用的飞行模式，并朗读飞行数据。还有一种不错的解决方法：在按钮旁标明用途，方便操控人员找到恰当的按钮。

MC32 无线电描述

- 开启照相机。
- 自动起飞 / 降落（左下方）。
- 高度控制（中间下方）。
- 通过操纵杆式断路器（右下方）保持悬停模式、返回出发点。



图 2-42　格洛普纳 MC32 无线电

无人机坠毁的主要原因往往是操作错误，遥控器不再是众多制造厂商的唯一操作系统，一些厂商（如传感飞行公司）把遥控器当作可选组件进行售卖，有的如天宝公司甚至

不再销售遥控器。现在，人们通过接入无线网络的台式电脑、平板电脑控制无人机——无人机飞行变成半自动驾驶。



图 2-43　控制“天宝 X100”的硬触屏平板电脑

视频接收装置

地面视频接收装置包括屏幕，以及与之相连、带天线的接收器。这里所说的屏幕可以是用来控制飞行的手提电脑屏幕，由 U 盘视频接收器连接。这种方法极其简便，而且能够在电脑上录制视频，但这需要一个反应时间，即现实与屏幕成像的时间差，有时可超过一秒钟。因此，专业人士更喜欢显示屏，比如 7 英寸的显示屏。我们可以用三脚架把显示屏支在地上；或者更常见的方法是，将显示屏与遥控器配合使用，让屏幕随时在操控人员眼前，即使操控人员转身跟踪飞行中的无人机，也没有问题。

最后一种方法是视频眼镜。带上眼镜后，佩戴者感觉眼前 1 米远处有一个 1 平方米的屏幕。专业人士很少采用这种方法，因为视频眼镜会把操控人员从周围环境中隔离，摘下眼镜时会令人头晕目眩，需要一段时间适应周围环境的光线。不直接参与任务的第三方可以使用这种眼镜。第三方戴上眼镜后，会感觉如同亲身乘坐无人机一般。



图 2-44　视频眼镜

在理想情况下，可以用眼睛观察到信号发射器与接收器之间的信号轨迹，也就是说，二者之间没有障碍。在实际应用时，接收器也会收到原始信号经周围障碍物反射后形成的信号，所以，会出现延迟或短暂信号减弱的现象，导致图像不清晰。有一个方案能够解决信号多路反射的问题：分两条天线接收信号，使每根天线接收的信号波长略有差异，如此一来，接收器可以收到最佳信号。

控制无人机使用的频率和接收视频所用的频率应该分开，以免相互干扰。前者使用的频率基本都是 2.4 吉兆赫，后者的频率约为 5.8 吉兆赫（在 5.740 吉兆赫到 5.860 吉兆赫之间）。接收器与发射器通常会有数个预先录制好的通道，按下按钮或拨弄小开关即可在几个通道间切换。用同一块电池为视频接收器和屏幕供电最方便，有时需要在两者之间安装变压器。

天线会：

- 不定向发射（球形），在各个方向接收信号结果相同；
- 定向发射（平面），天线要始终朝向指定方位。

不定向发射天线最实用，不过性能不佳。定向发射天线性能好，为了不必一直手持天线跟踪无人机，可以把天线安装在电动托盘上，始终指向无人机方向和飞行高度。

计算机设备

对于无人机来说，一台简单的手提电脑或平板电脑就可以作为驾驶台和分析台。



图 2-45　一个飞行软件和一个无线电调制解调器足够把你的电脑或平板电脑变成地面控制站。图片中的无线调制解调器配有天线

应选择在室外屏幕清晰度较高的电脑，必要时，还应装备遮光罩。另外，还要优先选择续航时间长的电脑。触屏平板电脑符合人体工程学需求。带有硬化触笔的平板电脑尤其适合在工地等室外条件下使用。

电脑或者平板电脑通过插在 USB 接口的无线电调制解调器与无人机联系。欧洲允许的频率是 433 兆赫，功率是 100 兆瓦，有效范围可达 4 公里。



图 2-46　六旋翼无人机的领航平板电脑，平板电脑上配有 3 个不同的天线

无人机发射与回收方式

这里仅讨论固定机翼无人机，因为旋翼无人机起飞与降落不需要地面辅助设施。

发射方式

手持发射起飞

轻型无人机可以手持发射，德国麦芬奇公司的“天狼星”无人机、传感飞行公司的“电蜜蜂”无人机功率强大，起飞时不需要借助外力弹射，只需松手即可。不过，如果无人机超过一定体积，起飞速度超过一定范围，手动投掷协助起飞会变得很危险，甚至根本不可能成功。手持引擎填满燃料的无人机，在凹凸不平的地面上奔跑，很可能造成严重的人身伤害，尤其是，如果撞上正在旋转推进的螺旋桨上，后果不堪设想。飞翼无人机没有机身，很难拿在手中，因此多被用于娱乐领域。



图 2-47　打着领带的无人机操控人员掷出麦芬奇公司的“天狼星”无人机，优雅至极



图 2-48　手持机翼两端，把“电蜜蜂”飞翼无人机掷出

邮

电

弹射器发射起飞

弹射器可以为无人机提供完美的加速度和起飞角度，其运行原理如同弓弩：一根管子连接着弹力带，曲柄和齿条将弹力带绷直；用手柄释放齿条后，安装在轨道车上的无人机弹射而出。弹力带在使用若干次后需要更换，而且，冬天的低温会影响弹力带的性能。



图 2-49　为“天宝 X100”无人机安装弹射器

滑行起飞

为此，无人机需要起落架和跑道。如果跑道狭窄，无人机在滑行时需要操作人员手动远程遥控，因为自动驾驶仪无法精确操作，让无人机准确地沿直线滑行。

回收方式

固定机翼无人机很难在狭窄的地面上降落，这种无人机最终需要采取一定的角度滑翔降落。矛盾的是，无人机飞行续航能力强的优点反而会对降落造成不利影响。无人机制造商通过如下设计方案解决问题。

- 传统飞机外形的无人机：着陆襟翼。襟翼能够提高阻力，无人机可以用更大的角度降落。
- 飞翼无人机：调转引擎转动方向，“天宝 UX5”无人机采用了这一技术。引擎产生反向升力，增大了无人机的降落角度。
- 着陆降落伞：无人机到达预定高度时引擎停止，降落伞张开。很明显，风会影响这种降落方式。降落伞还可以在出现飞行故障时保证无人机安全降落。



图 2-50　利用降落伞降落：C-ASTRAL 无人机在落地前几秒钟

军方还使用其他方法回收无人机。

- 用网回收固定机翼无人机：这种方法要求高精度导航，需要用差分全球卫星定位系统或视频导航；

- 通过预先设定的程序解体降落：如“渡鸦”等无人机到达着陆点后，无人机尾翼完全直立上扬，无人机坠落。无人机的部件按预先设定的程序解体，化解了坠地产生的动能，解体后的各部分很容易重新组装。这真是个聪明绝顶的解决方法！

保护措施与安全设备

由飞行员驾驶的传统飞机有两套安全电路，无人机机身无法搭载双重保护。从结构上看，无人机不如传统飞机安全可靠。另外，飞行员可以听到飞机的异常声响、嗅到特殊气味、看到飞机散发的烟雾、觉出不正常的震动，继而采取相应措施。而无人机却只能依靠传感器。依靠遥测连接，传感器能够启动地面站的视觉、听觉或震动警报系统，警告：

- 飞行高度过高或过低；
- 距离过远；
- 飞行电池电力不足；
- 全球卫星定位系统或者无线电联络质量下降或完全丧失。

部分无人机的自动保护措施会随着警报响起而自动启动：比如，在无线电联络切断的情况下，自动返航功能（Return To Home，简称 RTH）或着陆功能（Land）将自动开启。这些功能也可以在无人机进入操控人员设定的禁飞区时自动开启。机上的降落伞是最终的安全措施，也是飞行中规定的必需设备。



图 2-51　在比利时空中英雄公司生产的“监控师 700”无人机（右侧照片）携带的橙色口袋中，可以清楚地看到 2.5 平方米大小的法国品牌 Opale 降落伞（左侧照片）

多旋翼无人机的降落伞会叠放在用弹力带绑住的口袋中，位于仪表板下。弹力带被固定在一个伺服装置的轮子上，轮子转动，释放弹力带。降落伞在螺旋桨产生的风力作用下打开。降落伞使无人机转向后降落。

降落伞应该在至少 20 米的安全高度处打开，这样才有充足的时间让降落伞张开，降低无人机下坠速度。因此，利用无人机检查工程的做法引发不少争议。在这种情况下，无人机的飞行高度基本和建筑高度相仿，相对飞行高度太低。目前，还没有智能传感器有能力检测到无人机引擎、执行器和计算器等各部件的故障。

第三章

无人机如何飞行?

"人类应该飞离地面——直至大气层边远处，甚至飞出大气层。只有这样，人类才能彻底理解自己生活的世界。"

——苏格拉底

在航空技术出现一个多世纪之后，在天空中飞翔的飞机再也不会让任何人瞠目与惊叹。但是，面对一些无人机，人们仍会重新提出问题。本章将讲述飞行的主要原理，尤其是应用于无人机的原理。而且，无人机总重小，对风非常敏感，无人机操作新手应该对天气状况更加关注。

一点理论知识

我们都是可怜的地球人，地球上的所有物体都有质量，重力把我们牢牢拴在地面上。

不过我们也很幸运，四周被空气包围，而空气具有一定的密度。从行驶的车辆中，把手张开伸到窗外(希望这时候不是你在开车)，能够感受到"相对风"把手朝车辆行驶的反方向推动，我们由此意识到空气的存在。这种力在空气动力学中被称为"正面阻力"，其方向与物体移动方向相反。如果我们把手放平，感受到的风力明显减小。这是为什么呢？因为手掌接触风的面积减小，手掌的掌缘能切开空气，让迎风的部分更加符合空气动力学。

为了找到符合空气动力学的有利形状，我们只需观察自然。雨滴在从天空中下落的时候，头部呈圆形，尾部渐渐变得尖细。所以，当物体呈现某种适合的外形时，所受到的正面阻力将减少。重新看一下向车窗外伸出手的例子：保持手的水平位置，然后微微倾斜掌面，使手掌与地面呈一定角度，受到阻力的感觉重新出现了。这种情况很正常，因为手掌迎风部分的面积再次增加，而第二种力也出现了：手会有要上升飞翔的感觉。倾斜掌面让手掌与风之间出现一个角度，空气动力学上称之为"攻角"，使手上升的力被称为"升力"。当汽车前进速度发生变化时，上述空气动力学所涉及的力也随之变化。

但是，引擎也有最大功率的限制，而且很快就会耗尽燃料。引擎产生的力在空气动力学中被称为"拉力"。

在地球上，通过拉力产生空气动力，可以让物体摆脱仅能在地面上行进的命运（参见图 3-1）。我们将一道了解飞机和直升机如何利用这种方法飞行并控制方向。

空气动力学词汇小结

- **正面阻力**由相对风引起，作用方向和物体移动方向相反；
- **攻角**是倾斜的手掌和相对风吹来的方向之间形成的夹角；
- **升力**由手掌形成的攻角产生，是把手托向上方的力；
- **拉力**由推动物体前进的引擎产生。

所有飞行器都追求飞行速度快、距离远、能携带尽可能重的实用载荷、生产成本低等优点。所有制造商都竭尽全力减轻飞行器重量，同时希望在拉力尽可能小的情况下获得最大的升力与最小的正面阻力。

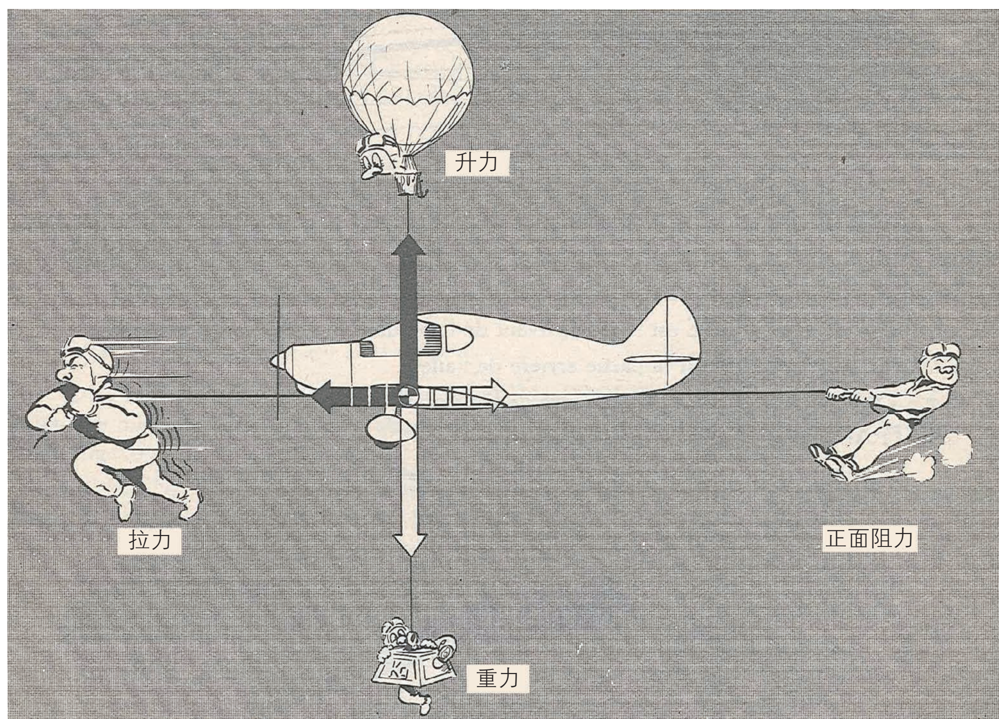


图 3-1　一架正在飞行的飞行器所受到的四种力

飞行包线①

飞行包线由速度和攻角限定，如果超出极限，任何飞行器都不能飞行，只能如石头一般落地。固定机翼与旋翼两种飞行器的情况各不相同。

固定机翼无人机

飞机在跑道上滑行，产生的相对风作用于机翼，在出现攻角时这种风会变成升力——这虽然是一种间接方法，但非常有效。

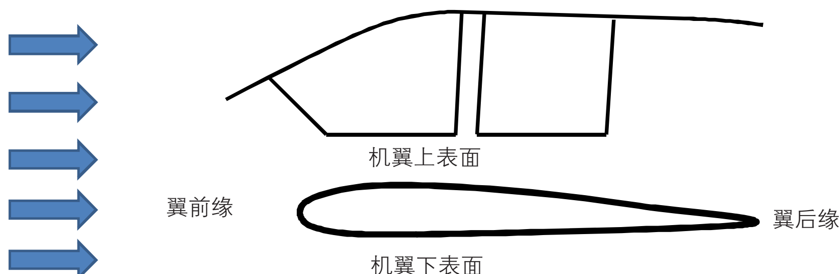


图 3-2　相对风与升力

固定机翼的升力与能够形成攻角的飞机副翼边缘的倾斜度关系紧密，用一句话可以总结这种规律：“升力与攻角息息相关。”除此之外，另外两个因素对升力的影响也至关重要——机翼外形和升力骤降。

机翼外形

升力还取决于机翼外形，因为空气分子碰到翼前缘后，分别沿着机翼上下表面分开，绕过机翼继续前行。

① 飞行包线：飞行包线是以飞行速度、高度和过载等作为界限的封闭几何图形，用以表示飞机的飞行范围和飞行限制条件。——译者注

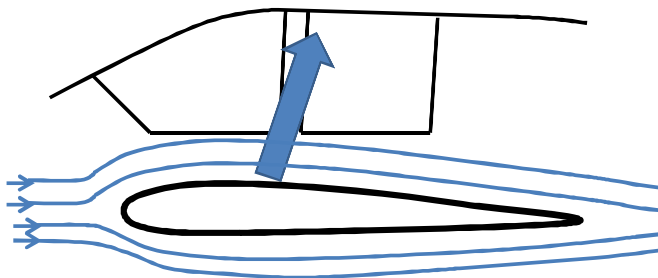


图 3-3　相对风对机翼产生的升力

然后，分别沿着机翼上下表面分开的空气分子将在翼后缘处再次重逢，如同爱情故事中的情节一般。从剖面看机翼上表面距离较长，为什么分别沿着机翼上下表面运动的空气分子还会在翼后缘汇合呢？答案很简单：沿上表面运动的空气分子速度加快了。这一加速度导致机翼上表面压强小于机翼下表面压强，于是机翼会被“吸”向上方。

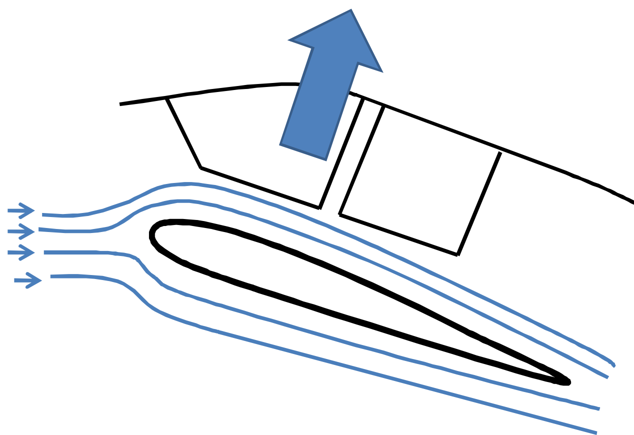


图 3-4　攻角增大使升力加强

升力骤降

攻角超过一定临界时，升力骤降，机翼上表面的“空气网”脱落，人们称这种现象为飞机“失速”。在这种攻角下，飞机不再飞行，而是在下坠。

飞机在一定高度水平飞行时，攻角和速度有着密切的关系：速度低时，需要让飞机上仰保持飞行高度（拉飞机操作杆），否则飞机将下坠；速度高时，正相反，需要推飞机操作杆，否则飞机将上升。因此，飞机处于临界攻角时，必然导致飞行速度降到最低，这时的速度被称为“失速速度”。所以，固定机翼无人机的飞行包线受到其失速速度的限制。

仔细审视图 3-5：攻角呈 15 度时（上图），升力达到最大值，但空气网无法再粘贴在机翼上表面的后半部分，在机翼下表面产生了湍流区域（蓝色部分）；如果攻角增大到 18 度（下图），飞机失速，整个机翼下表面几乎不再粘贴空气网，此时，升力骤然下降，飞机头部向下俯冲，机身迅速坠落。

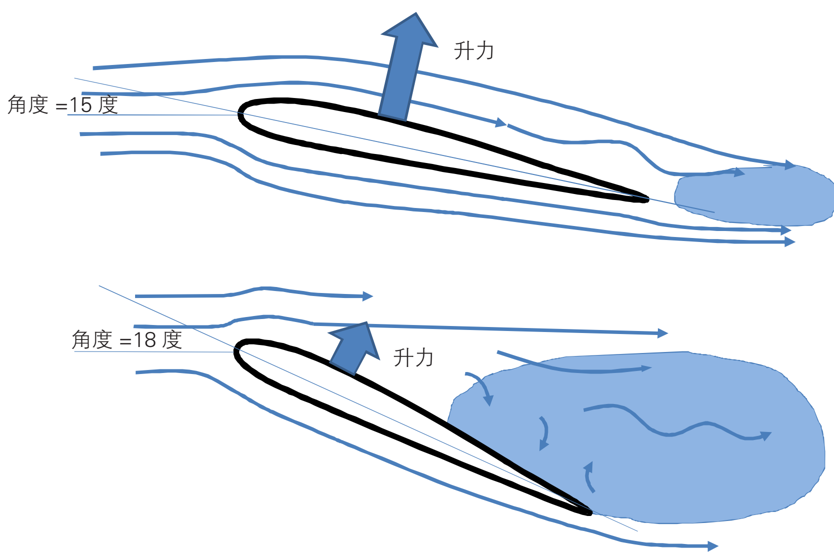


图 3-5　攻角 15 度（上图），攻角 18 度（下图）

这种现象导致两种结果。

1. 为了顺利起飞，固定机翼无人机要么需要在跑道上滑行，要么需要手动投掷或者使用投射器发射。飞机起飞与降落几乎都是沿着水平方向前进，而且前进方向应该逆风，因为是相对于风的速度产生了升力，而非相对于地面的速度。所以，起飞需要一片方位理想、开阔、没有障碍物的场地。

无人机的飞行速度等于失速速度时会直线下坠，如果低于失速速度就更不能维持飞行状态了。因此，必须把飞行速度提高到高于失速速度，才能保证正常飞行，而且要保持这种速度直到降落。接触地面时，飞机速度从 V（高于失速速度）降到 0。整个着陆过程非常剧烈，尤其是在自动驾驶模式下采用滑行平飞时。滑行平飞操作需要在接近地面前预先准备，而准备工作需要转为手动操作，因此不能确保安全。

2. 固定机翼无人机对湍流非常敏感，而湍流往往出现在靠近地面的地方。着陆是固定机翼无人机最容易损坏的时候，因为低速度会影响操作指令的执行效果。无人机应该保证一个最大上升角度，超过这一角度时，无人机的速度（和升力）会骤降；同时，应保证一个最大下降角度，超过这一角度时，无人机的速度会猛增。

旋翼无人机

如同飞机机翼位移产生升力，旋翼飞机通过旋翼的旋转产生升力。旋翼桨叶和小型机翼的运作原理一样，也有攻角和特定的外形。旋翼飞机的飞行应用领域比固定机翼飞机更加宽广。因为，只要旋翼能够提供足够的升力，旋翼飞机就能够在静止状态下起飞、在空中悬停、侧飞，甚至倒飞。为了提高升力，可以采用加大旋翼旋转速度或者增加桨距的方法。

这就是多旋翼无人机和传统直升机最根本的区别。多旋翼无人机仅靠改变旋翼旋转速度的方式就能改变升力。这是因为其螺旋桨体积小，因此惯性也相应较小，而且由电动机提供动力，可以进行很精细的操作。传统直升机的主螺旋桨旋转速度恒定，只能依靠调整桨距的方法改变升力，导致机械构造变得非常复杂。改变桨距能让“小机翼”的攻角变化，从而改变升力。

旋翼的旋转速度不能超过旋翼末端的旋转速度，否则升力下降。这是直升机和多旋翼无人机无法逾越的“高墙”。尽管如此，旋翼的旋转速度还有提升的余地，因为旋翼末端的速度可以达到 400 公里 / 小时。

在引擎发生故障的情况下，直升机式无人机比多旋翼无人机多了一个无可争议的优势。直升机式无人机不会直线下坠，大胆操作仍然可以挽救无人机，这种挽救方法就是自动旋转。调整旋翼桨距，使旋翼在飞机下落且没有动力的情况下仍能继续旋转，在接近地面时，操控人员迅速大幅增加桨距，让升力大幅提升，无人机下落速度在短时间内减缓，几乎可以做到平稳降落。

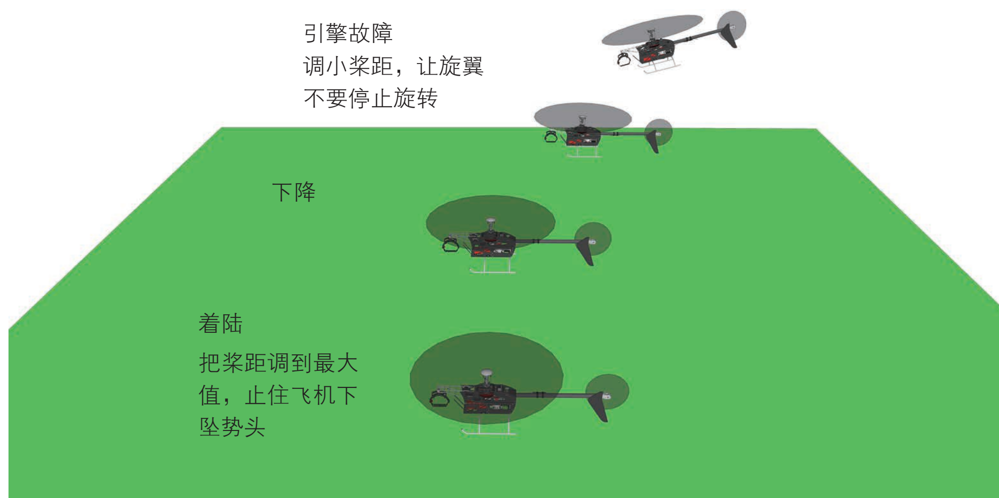


图 3-6　在引擎故障的情况下实施自动旋转，让飞机着陆

多旋翼无人机则不具备这种应对手段：在出现故障时，飞机会向最重的一边倾斜（通常是安装电池的一侧），然后坠毁，只有安装降落伞才能挽救危局。

固定机翼无人机和旋翼无人机拥有一个共同的敌人——自身重量。

- 重量大的飞机其飞行包线较小：飞机失速速度较快，巡航速度较慢，因为需要保持大攻角才能确保在飞行的各个阶段中获得必要的升力。质量大的飞机惯性也大，所以操作性差，在降落时要承受更多次的撞击。
- 重量大的旋翼机速度较慢，操作性较差，稳定性更是不佳，因为可用于抵御阵风的多余动力不足。

如何控制无人机的方向？

在了解了无人机如何飞行以后，现在看一看如何定义无人机飞行的姿势和动作。为了确定无人机的姿势和动作，人们用立轴、横轴、纵轴三条轴线标记无人机的位置。那么，如何沿着这三条轴线控制飞机呢？

固定机翼无人机借助各种舵进行操控，而旋翼无人机则通过调整旋翼旋转速度或桨距加以控制。

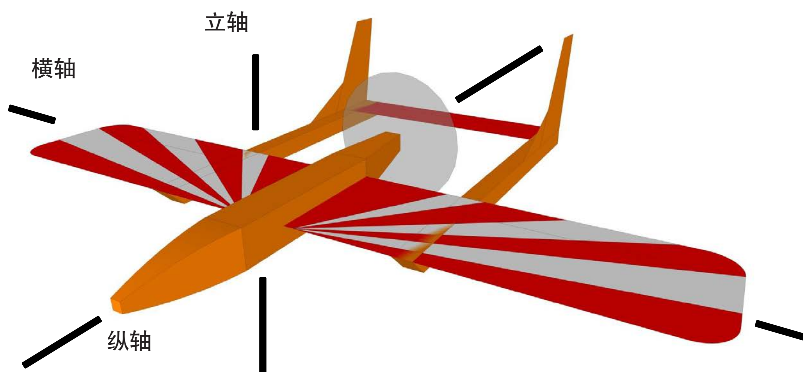


图 3-7　三条轴线确定飞机的姿势：立轴、横轴、纵轴

固定机翼无人机

固定机翼无人机机身表面的可移动部分可以对飞机进行控制，包括副翼或者升降副翼，以及升降舵、方向舵。

这些舵面应尽可能远离各自控制的轴线，依据杠杆原理使其发挥最佳作用：方向舵和升降舵位于飞机尾部；（飞机外形无人机的）副翼与（飞翼无人机的）升降副翼都位于机翼末端。

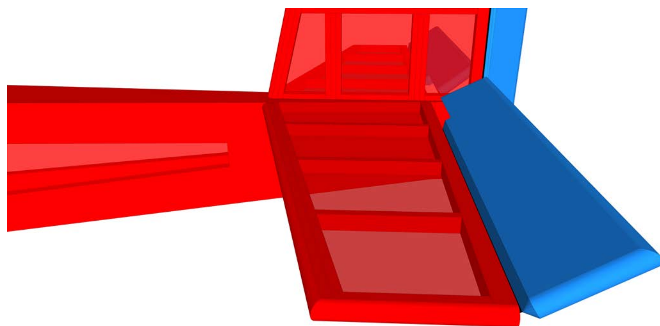


图 3-8　升降舵（蓝色部分）：令无人机上仰的操作

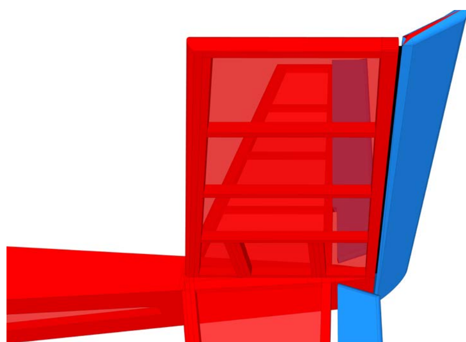


图 3-9　方向舵：令无人机右转的操作

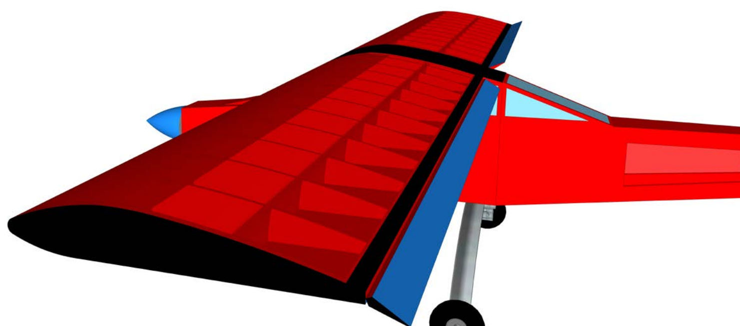


图 3-10　副翼：令无人机右转的操作

传统飞机外形的无人机在转向时，副翼、方向舵和升降舵将配合发挥作用（参见图3-11）。

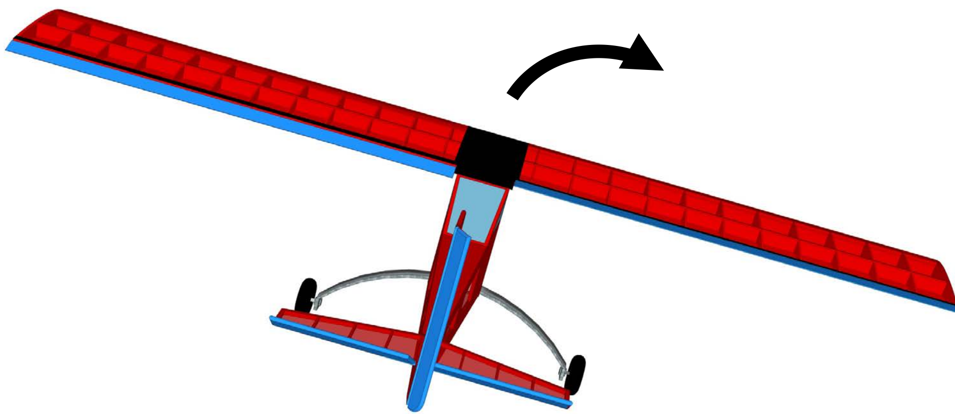


图 3-11　实现转向

朝反方向操作两个升降副翼，实现飞翼无人机的转向（参见图 3-12）。

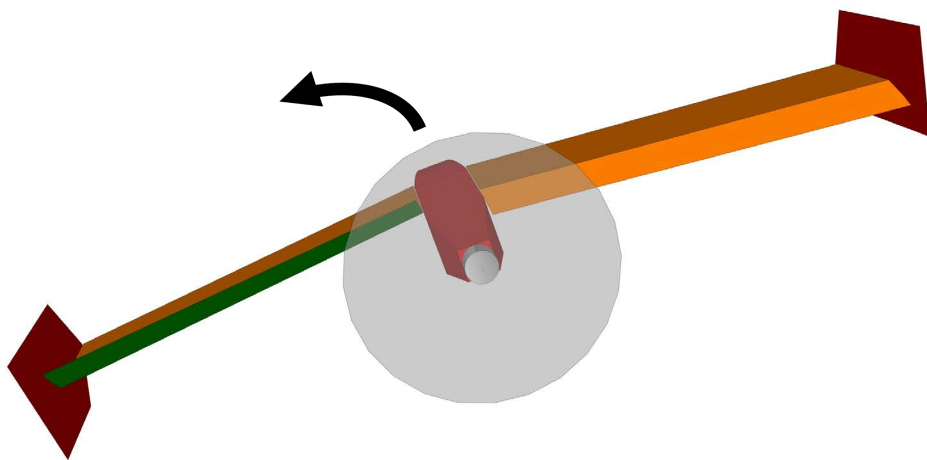


图 3-12　操作两个升降副翼实现飞翼无人机的转向

通过朝同一方向控制两个升降副翼，实现飞翼无人机的上升与下降（参见图 3-13）。

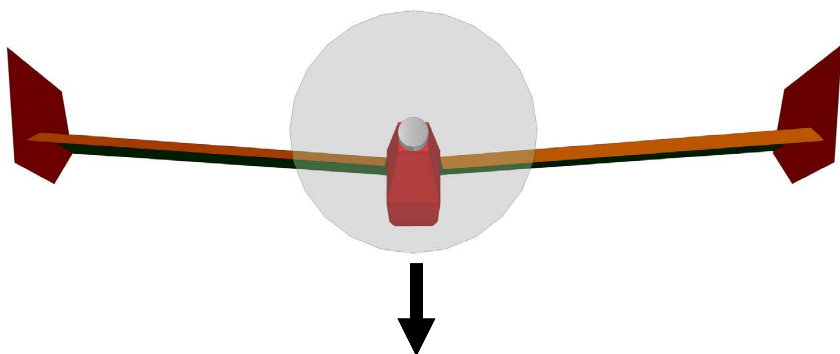


图 3-13　两个升降副翼抬高：飞翼无人机下降

飞机上升需要加大动力，下降需要减少动力，否则飞机速度会过快。固定机翼无人机在转向时有增大攻角的趋势，导致正面阻力增加，所以速度减慢。为保持速度恒定，必须增加动力。

无人机自动驾驶仪在调节好后能够自己选择最优解决方案——比人在地面上遥控的效果要好得多。尽管存在强风、阵风等因素，自动驾驶仪在对比机上传感器上接收的数据和预先规定的数据后，会自行操控舵面并控制动力系统，采取相应措施。

旋翼无人机

直升机式无人机

传统直升机式无人机通过改变主螺旋桨的一个或两个桨片的桨距控制飞行，主螺旋桨位于整个或者部分旋转盘之上；也可以通过改变尾部螺旋桨的桨距控制飞行。实际上，传统直升机式无人机的一切飞行问题都与升力和螺旋桨旋转的相互作用力息息相关。

控制立轴

直升机式无人机在空中悬停的时候，尾部螺旋桨桨距经过调整，可以正好抵消主螺旋桨与机身产生的力矩。通过调整尾部螺旋桨桨距还可以实现对立轴的控制。

图 3-14 描述了用尾部螺旋桨抵消主螺旋桨产生的力偶矩为何非常重要。当主螺旋桨产生的力（用红色箭头表示）与尾部螺旋桨桨距产生的力（用绿色箭头表示）相等时，直升机在空中悬停（参见图 3-14 左图）；如果尾部螺旋桨产生的力矩减小，直升机向右旋转（参见图 3-14 中图）；如果尾部螺旋桨产生的力矩增大，直升机向左旋转（参见图 3-14 右图）。

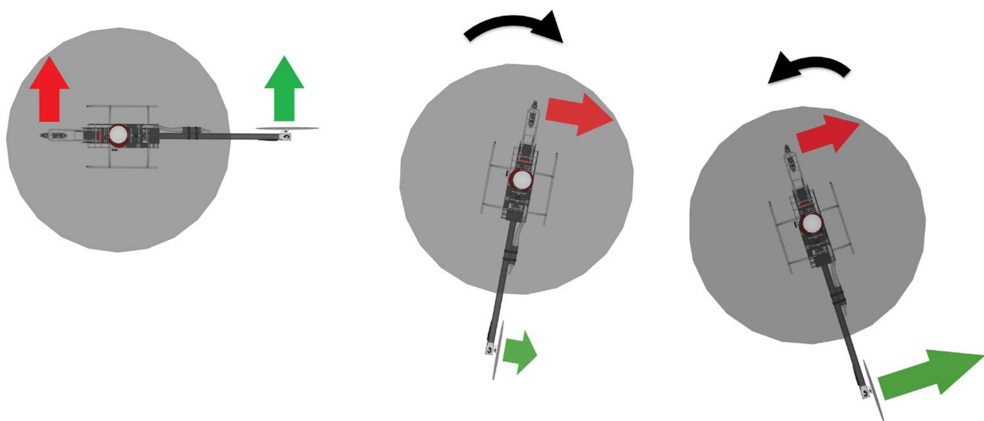


图 3-14　直升机悬停（左图）；如果尾部螺旋桨的力矩减小，直升机向右侧旋转（中图）；如果尾部螺旋桨的力矩增大，直升机向左侧旋转（右图）

上升与下降

同时改变两个桨叶的攻角，实现调整升力的目的，这一方法称为“统一变桨距控制”。

统一变桨距控制

- **上升**：增大总桨距，抑制力偶增大，尾部螺旋桨桨距增大。
- **下降**：减小总桨距，抑制力偶减小，尾部螺旋桨桨距减小。

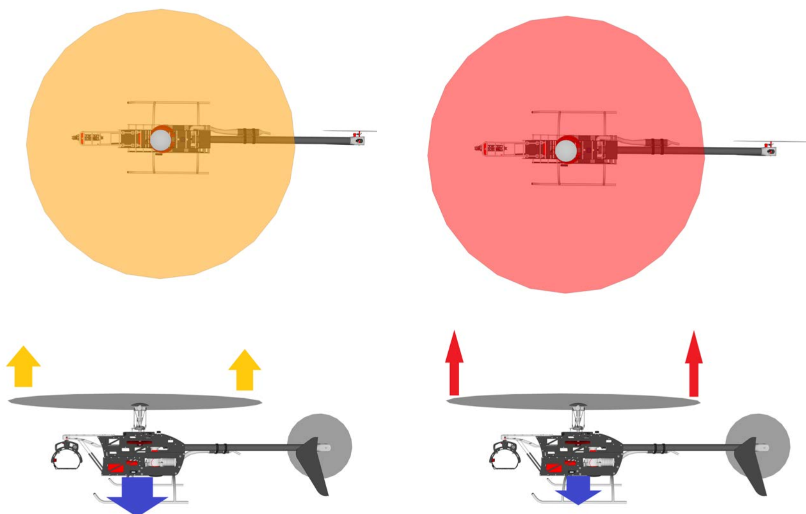


图 3-15　在空中悬停时（左图），作用于整个旋翼面的升力与飞机所受重力相等。上升时（右图），作用于整个旋翼面的升力超过飞机所受重力

在桨距增大时，引擎运行更加吃力，转速降低。为了确保转数恒定，需要增强动力。在下降时则情况相反。

控制横轴与纵轴

主螺旋桨的桨叶彼此独立，可以分别改变各自的桨距。桨叶每转一圈，桨距每秒改变若干次，这就是周期变距。因此，可以仅仅增加旋翼面上某一部分的升力，在图 3-16 中增加的升力部分用红色表示。

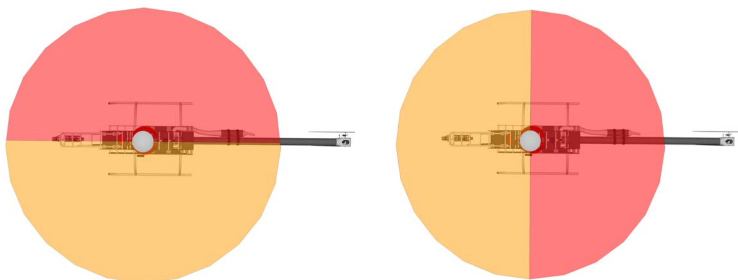


图 3-16　直升机右侧升力增加，用红色表示（左图）；直升机旋翼面后侧升力增加（右图）

为了让直升机倾斜，并向某一方向前进，按道理，应该增加与前进方向相反的旋翼面的升力。在实际应用中，还需要考虑到陀螺进动现象，这一现象使整个旋转体系的运动方向与作用力形成 90 度角（四分之一圈）。为了更形象地说明问题，我们以自行车轮为例：实验者用手托住自行车轮，伸直胳膊，使自行车轮呈水平放置。请他人帮忙转动车轮，同时尝试让车轮向前倾斜——车轮竟自己将向侧面移动了！为了让车轮向前方倾斜，必须同时使其向侧面倾斜，这种现象被称为“陀螺进动”。

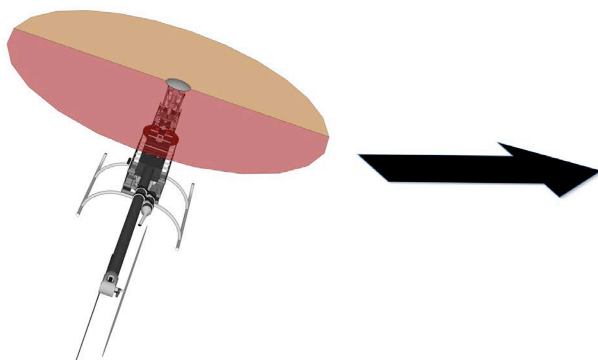


图 3-17　作用于旋翼面后部的升力增加，直升机向右侧移动

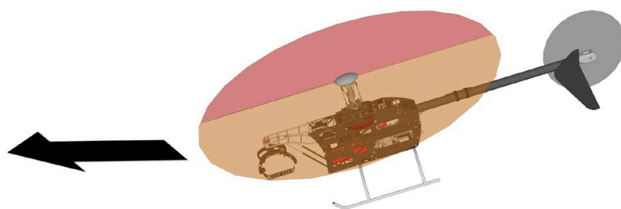


图 3-18　作用于旋翼面左侧的升力增加，直升机向前推进

多旋翼无人机

多旋翼无人机配备若干对桨距和旋转方向相反，且向下方产生作用力的螺旋桨。为了操纵这种无人机在所有轴线上的运动，仅需改变旋翼的旋转速度即可。

两种四旋翼无人机

四旋翼无人机有两种类型，根据前引擎和自动驾驶仪是否在同一直线上区分：如果二者在同一直线上，无人机呈“+”型；如果二者不在同一直线上，无人机呈“×”型（参见图 3-19）。“×”型无人机多被应用于摄影摄像领域，因为这种无人机实用载荷前方的视野更加开阔。

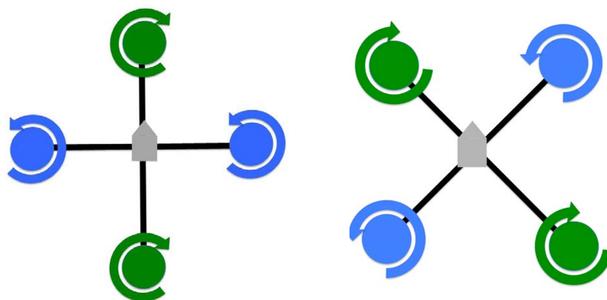


图 3-19　“+”型四旋翼无人机（左图），“×”型四旋翼无人机（右图）

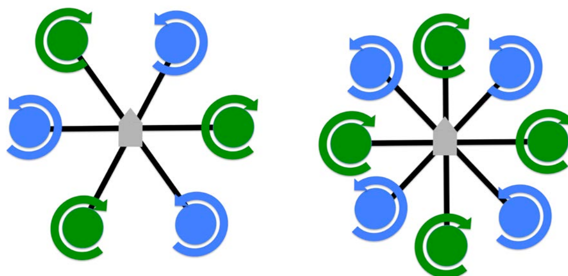


图 3-20　六旋翼无人机（左图），八旋翼无人机（右图）

在空中悬停时，所有螺旋桨以相同速度旋转，成对螺旋桨彼此平衡。上升时，所有旋翼转速提高。向某一方向运动时，必须打破平衡：处在与前进方向相反位置的螺旋桨加快转速，多旋翼无人机会朝预计方向倾斜并前进（参见图 3-21）。

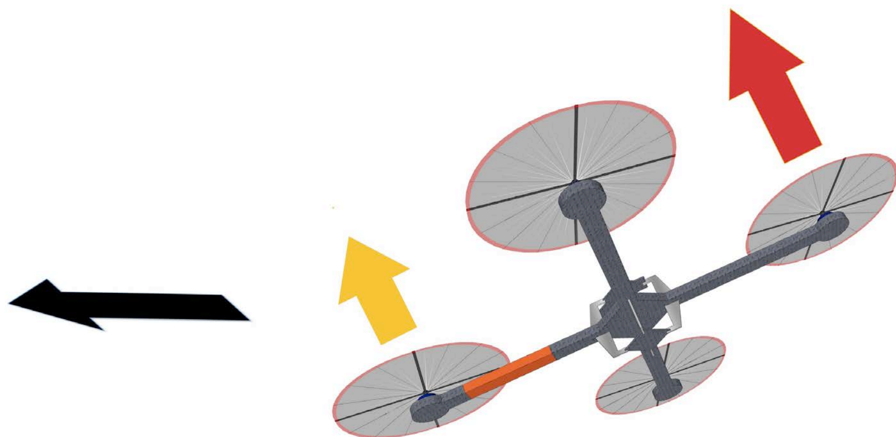


图 3-21　多旋翼无人机运动：前进时，需要降低前方的引擎功率，同时提高后方引擎功率。引擎功率整体升高，既能保持高度，又能在水平方向产生速度

为了控制立轴，应围绕垂直轴线制造旋转力：这种力可以通过改变成对螺旋桨的旋转速度而获得。比如，若想使一架四旋翼无人机沿顺时针方向旋转，前后两侧的螺旋桨要加速旋转，左右两侧的螺旋桨要减速旋转（参见图 3-22）。四旋翼无人机会在保持同样高度的情况下顺时针方向旋转。

驾驶多旋翼无人机时，不需要担心螺旋桨的旋转速度，因为自动驾驶仪会控制螺旋桨转速，操作人员只需扳动遥控器上的操纵杆即可。

大家现在知道了，多旋翼无人机的螺旋桨要花费时间提高或降低旋转速度。制动系统的动能白白丧失，这种空气动力学制动系统仍有改进的空间。无人机制造商研发出了新型控制系统，能够制动并回收消耗的能量为电池充电。这样可以令无人机延长大约 10% 的飞行时间。

旋翼越多，无人机越稳定：如果旋翼数量众多，那么在阵风刮来的方向就有更大可能存在旋翼来对抗阵风。

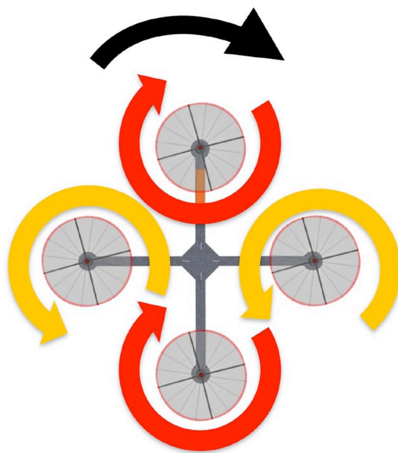


图 3-22　四旋翼无人机向右侧旋转：红色箭头代表引擎加速，橙黄色箭头代表引擎减速

无人机倾斜程度超过 30% 时，升力会骤降，导致无人机加速下坠。为了避免这种情况，大疆创新等企业研发的自动驾驶仪具备限制无人机倾斜度功能。

天气的重要性

我们能够看到河水浪涛滚滚、旋涡湍流、激流冲击……实际上，空气中存在同样的现象，因为空气也是一种流体，只不过凭肉眼看不见这些现象而已。无人机要在这样的环境中执行任务。无人机质量轻，因此对空气流动更敏感，受到的影响很大。

风

无人机能够承受多大的风力？其实，即使是强度很弱的微风也能让无人机的表现大打折扣：风会让无人机消耗更多的电能，因为无人机要用更多的动力顶风前进或者保持静止。侧面吹来的风会让无人机偏离航向。为保证能够按照飞行计划的路线前进，无人机需要“蟹式”飞行，即在飞行时朝风吹来的方向偏转，空气速度保持恒定，地面速度减小。比如，一架无人机以 80 公里 / 小时的速度飞行，遭遇侧面吹来风速 40 公里 / 小时的风（风与飞行方向垂直），无人机相对于预定方向朝风吹来的方向偏转 45%（参见图 3-23），其相对于地面的速度降低为 40 公里 / 小时。因此，飞行同样的距离需要双倍的时间。由于电池续航能力弱，有时需要考虑连续更多次飞行来完成同一任务。

为保持悬停状态，旋翼无人机必须向风吹来的方向倾斜，并加速旋翼转速（参见图 3-24），这也将导致续航时间减少。

根据一般规律，在风速不超过无人机最高速度一半的时候，才可以使用无人机。也就是说，对于固定机翼无人机“天宝 X100”来说，风速不能超过 40 公里 / 小时；对于 4 公斤重的多旋翼无人机来说，风速不能超过 25 公里 / 小时；对于 1 公斤左右的无人机来说，风速不能超过 15 公里 / 小时。

在法国大多数地区，几乎全年都可以使用无人机。而且和传统大型飞机不同，使用无人机不必考虑去程和返程时的异地天气，因为只有当地的天气状况会对执行任务有影响。

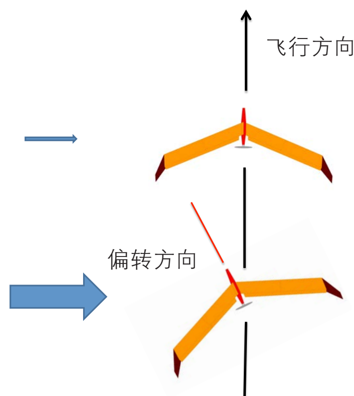


图 3-23　面对侧方吹来的风，无人机需要朝风吹来的方向偏转才能保证沿着预定飞行路线前进



图 3-24　在风力较弱时，四旋翼无人机能在空中悬停。如果风力变大，四旋翼无人机应朝风吹过来的方向倾斜，引擎加速，尽力恢复无人机初始姿态

最令人担心的是无法预测的阵风。这种风会让原本笔直的飞行路线变得蜿蜒曲折，让拍摄测量数据的计划毁于一旦，空中悬停的无人机会像溜溜球一样上下起伏不定。在这种情况下，观看拍摄的视频一定会让人头晕目眩！

阵风在靠近地面处风力最强，因为空气在接近障碍物或地面时，会由于遇到阻力而产生旋涡。这种情况对要着陆的固定机翼无人机来说非常危险，因为阵风会导致飞机在低速状态下连续失速。另外，风吹入狭小空间时风速加快（比如两个建筑物之间，或者两座山之间），这就是“文丘里效应”。而且，风速会随着海拔升高而加快。在离地面 100 米处的风常常比地面风的风速高 10 公里 / 小时。如果无人机因风力而偏航，操控人员的第一反应应该是让无人机下降到风力较弱的高度。

上升气流与下降气流

更复杂的是，空气出现湍流的情况时往往没有明显的规律可循。气流在地势高低起伏的地方会产生动力效应：在迎风坡上升（利于延长飞行持续时间），然后下降，甚至突然下降并转向。在山区、滨海的沙丘和悬崖边飞行时，应该注意这种现象。

阳光照耀大地时也会造成空气流动。和大家通常的想法不同，气流流动要在几十米高处才能感受得到。零散的小片云是上升气流的中心。但是，在天气特别干燥的时候，即使没有小片云也会存在上升气流。尽管无人机有自动驾驶仪和引擎的帮助，但在飞行过程中还是会上下颠簸。

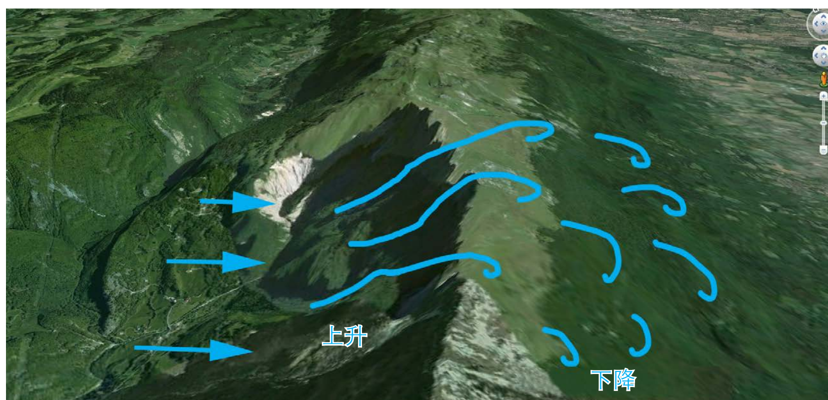


图 3-25　背坡气流下降，风力向下

云和雨

无人机应该对一个“魔鬼”敬而远之，而外行人对此知之甚少，这个“魔鬼”就是积雨云。这种云形如铁砧，预示着暴雨即将来临。积雨云通常伴随骤雨、冰雹、强风。小到塞斯纳（Cessna）小型飞机，大到空中客车巨型飞机，所有飞机都要避开积雨云，躲开强劲的气旋，以免导致飞机失控。气旋会把固定机翼无人机吸上数千米高空。积雨云的影范围达到 10 公里以上，等积雨云远离后再让无人机起飞，才是稳妥的做法。

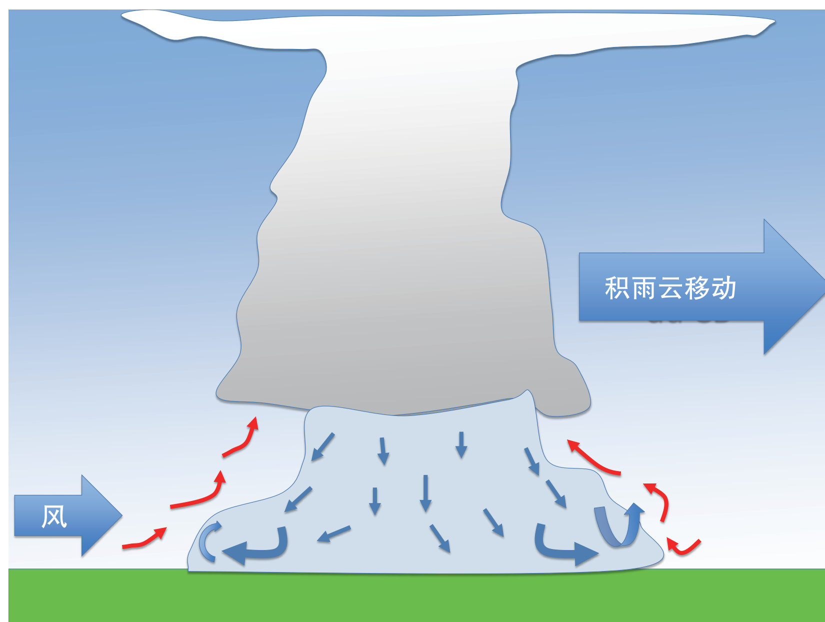


图 3-26　积雨云（简称 CB）生成的气流

云是无人机的敌人，它会让操作者看不到无人机，还会遮蔽入侵者，如飞机、直升机等无人机应该避开的物体。

在冬天，云层通常会很低，所处高度让人难以估计。有经验的无人机操控人员有一个应对办法——关注航空天气预报。这种天气预报每小时都会指出最低云层的高度，操控人员可以根据天气预报做好安全防范。

电子元件不喜欢水！尽管一些无人机的结构拥有一定封闭性和防水性，可以抵御小雨，但大多数多旋翼无人机并不防水。而且，雨水会妨碍无人机的拍摄工作（尤其是透视效果的照片）。同时，雨滴还会打湿镜头……

不论飞机大小如何，无人机、飞机、直升机都要遵循同样的物理法则，面对同样的天气约束。

现在是挽起袖管实际操作无人机的时候了！

第四章
如何遥控无人机?

“我热爱飞行，它能把我从琐事的重压中解放出来。”

——安东尼·德·圣-德埃克苏佩里

自动驾驶仪虽然可以让无人机自动飞行，但是仍需要身处地面的操作者掌控全局。

今天，遥控器、电脑、全球卫星定位系统、视频传输装置相互配合，产生了各种遥控形式，过去的航模技术逐渐被取代。电脑能够在一定程度上保证自动驾驶，无人机可以单独完成一些任务，但是无人机操控人员依然需要在整个飞行过程中保持警惕。记录下来的数据以后可用于分析或者重新使用。

不同的遥控方式

视觉直接遥控

用肉眼观察直接遥控是最传统的遥控方式。

操控人员亲眼观察无人机在各条轴线上的高度、与地面的距离、遇到的障碍，通过移动遥控器上的操纵杆控制无人机的飞行。无人机会不断遇到风、阵风，操控人员要依靠敏锐的目光、协调的动作、集中的注意力保证无人机飞行顺利。如果无人机飞出操控人员的视野之外，哪怕在操控人员打喷嚏或者与他人交谈只言片语的一瞬间，都可能导致无人机坠落。

确保固定机翼无人机持续、稳定地飞行绝非易事，轮到旋翼无人机更是难上加难。无人机需要依靠逐渐增强动力保证顺利飞行，但电池电力会逐渐消耗。而且，旋翼无人机飞远后，操控人员可能会失去视觉参照物，无法分辨何处是旋翼无人机的前端，弄不清楚前进方向。

无人机面对操控人员返航的操作非常难以处理，因为此时的遥控命令与正常飞行时相反。最简单的方法是想象自己坐在无人机上，如果需要的话，可以稍微转过身来与无人机返航方向保持一致，这样一来，操作会更简单。此外，手动遥控飞机的同时操控实用载

荷，几乎是不可能完成的任务。



图 4-1　手动模式遥控无人机时，不能让无人机离开视野

无人机逐渐远离地平线后，传输的视频中展现机身下方地面的部分将越来越少，“二维平面”视频越来越多，所以很难确定方向。当飞行器远离时，人们会觉得它在下降，飞行器靠近时，人们会觉得它在上升。另外，阳光能使操控人员头晕目眩，看不清楚无人机的位置，此时可能发生坠机事故。

基于以上原因，手动遥控无人机的时间不应该太长，只在必要情况下使用，比如，在几个需要高精准度的特定阶段——起飞、降落、在障碍物附近飞行时使用手动遥控模式。在出现故障或者躲避障碍物时，必须使用手动模式。

通过视频传输，实境驾驶

航模爱好者都有过一个梦想：透过视频操控自己的模型，犹如亲身登上了飞机。

凭借发送设备微型化技术，这个梦想在近十年之前就能够实现了。不过，实境驾驶比在地面上直接依靠视觉驾驶的难度更大。操控人员必须习惯不断颠簸晃动的图像。另外，在摄像机拍摄天空或地面等情况下，操控人员无法看到地平线，很容易迷失方向。失去地面参照物，操控人员不知身在何方，很可能操纵无人机飞出视频传输的有效距离，而让无人机沿直线飞行是一项巨大挑战。机载摄像机不足以拍摄到一个整体视野。反之，“广角”图像往往产生变形：通过二维平面图像很难估算远近距离与高低起伏。

最后，传输的视频会因干扰而短时模糊，比如遇见障碍物或飞行器产生震动等情况。在面向太阳或在阴影下飞行时，视频会出现重影现象。

屏显菜单信息图像（OSD）上的各种飞行参数（飞行器姿势仪、飞行角度、海拔……）为视频实境驾驶提供有效帮助。

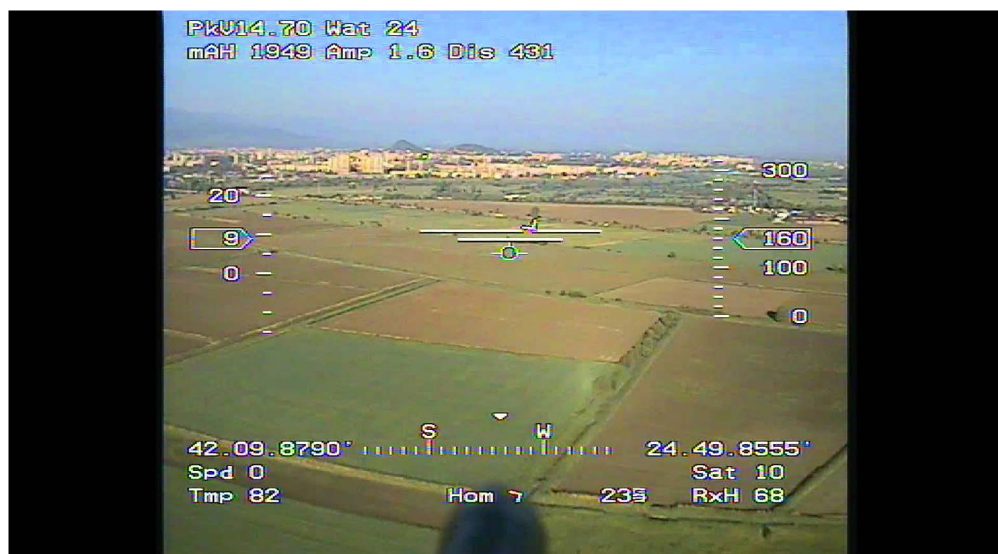


图 4-2　接收到的图像上标注各种飞行必要基本参数：飞行器姿势仪数据、飞行角度、海拔、电力消耗等等

欧洲相关法令规定，通过视频实境驾驶无人机时，必须有人在旁边协助，协助者自始至终必须依靠视觉直接观察无人机的飞行状况。

仅仅通过传输的视频图像控制无人机困难重重，因此，人们往往用这种方法管理实用载荷，而不会用来操纵无人机。

用电脑鼠标控制飞行

飞行距离超过几百米以后，很难通过肉眼直接观察的方法准确估算无人机的位置，因此，必须在电脑屏幕上使用地图导航程序。操控人员对无人机也不再发出“向左转”、“上升”之类的传统命令，而是命令无人机“向那边飞行”。在屏幕后方，操控人员的角色和航空管制员越来越相似。这种“不依靠视觉”的飞行方式对空中交通和地面居民会造成潜在危险，因此要接受民用航空法律的严格管制。

使用各种自动装置能够保证完成专业水准的工作。

几种不同的飞行模式

每年，参观法国布尔日航空展的忠实观众最热衷观看让人眼花缭乱的战斗机特技表演。但大家恐怕会对无人机的飞行展示感到失望。专业无人机在飞行中没有任何奇招：无人机只会平稳地飞行，然后迅速消失在人们的视野之中。只有无人机在大屏幕上的视频直播能够略微吸引注意，不过观众很快又会心不在焉，因为视频直播实在单调无聊，而且质量欠佳。无人机在大部分飞行时间里都属于自动驾驶，因此，观众大多会感到枯燥无味。

自动驾驶为无人机操控人员减轻了负担，操控人员可以专注于任务的进行状态，以及对实用载荷的控制上。在纯手动遥控和完全自动驾驶之间还有多种中间模式，可以在地面上手动选择，事先分阶段预设切换各种模式，或者在出现情况时随时改变控制模式。

基于安全原因，操控人员在无人机自动飞行期间准备随时接手，因为操控工作比其他所有工作更加重要。

（辅助）平稳模式

操控人员对无人机直接下达控制命令，一旦双手离开手柄，自动驾驶仪接替驾驶无人机，保持其飞行高度和稳定性。遇到阵风时，无人机可以自动做出相应调整，保证正常飞行。固定机翼无人机的转弯很简单，只需要调整副翼即可，自动驾驶仪负责控制升降舵和方向舵。即使操控人员坚持发出命令，自动驾驶仪仍然会阻止无人机超过允许的倾斜界限和纵摆界限。

这种模式可以纠正操控人员犯下的错误，保证无人机在飞行包线内行进。不过在起飞和降落时，该模式就会存在局限性，因为自动驾驶仪不能和手动驾驶一样反应灵敏。

下边讲到的所有模式都需要全球卫星定位系统。

悬停模式

在这种模式下，旋翼无人机保持悬停状态，即使在风中也不例外。无人机借助全球卫星定位系统原地不动。使用悬停模式时，固定机翼无人机保持高度，围绕当时自己所处位置盘旋。

该模式可以让操控人员在一段时间内全神贯注地使用实用载荷，用相机取景拍摄。此时，无人机如同“飞行拍摄杆”，随意上升下降，同时保证无人机的位置和方向。这种模式也可以被称为“等待模式”，用于躲避危险，或让操控人员稍事休息。

只要在控制台上进行一步操作就可以进入这种模式，操控人员只需松开操控，无人机即可进入悬停模式。

返航模式

在无人机过分远离情况下，这是最佳应对模式，无人机会返回在启动时存录的全球卫星定位系统坐标位置。

返航模式分几步进行：首先，无人机到达预先设定好的安全高度，目的是在各种障碍物上方飞行；然后，无人机向“家”的方向飞行；到达目的地后，无人机切换成悬停模式，请操控人员选择手动控制或是让无人机自动降落。

返航模式常常与失效保护措施配合使用：失效保护模式在无线电联系切断、电池能量不足等意外状况下自动启动。当然，返航模式只有在和全球卫星定位系统保持通信的条件下才能够使用。

自动起降

对于旋翼无人机来说，只需要按下一个按钮，无人机就可以上升至几米的高度然后保持悬停状态；降落时，随着机身接近地面，无人机速度不断下降，然后在接触到地面时自动关闭引擎。

对于固定机翼无人机来说，自动起飞需要先判断风向，确定风向后相应地决定无人机的起飞方向。一旦无人机相对于空气的速度超过规定值（比如在手动抛出无人机或者用投射器射出无人机后），自动驾驶仪将启动引擎，调整无人机获得理想的上升角度。着陆时，无人机需要逆风呈环形路线下降。

凭借以上几种模式，操控人员不必在飞行过程中操作无人机完成最为关键且危险的步骤。

着陆环线

无人机飞回起点，沿螺旋状线路下降至离地 75 米高度，顺风飞行 650 米后转弯，继而沿基线飞行 150 米，之后进行着陆过程中最后一次转弯，最终降落并停在距离预定点 15 米外的地方。

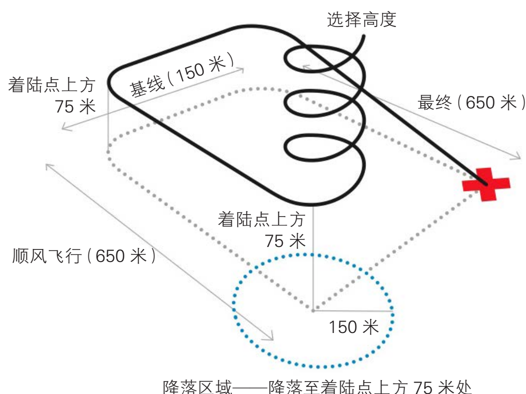


图 4-3 “天宝 X100”无人机着落环线

自动航行模式

无人机行业的专业人士对自动航行模式最感兴趣，因为可以用这种模式预先为飞行编程。

什么是预编程飞行?

预编程飞行就是让无人机到达一个或一系列中继点（Way Point，简写为 WP）：这些中继点的位置由地理坐标（纬度、经度）和高度决定。无人机处于两个中继点之间的飞行速度和到达每个中继点的行动都可以设定。比如，可以预先规定无人机等待一段时间，或者使用实用载荷拍摄照片。通常情况下，在无人机起飞前，可以先将设定的程序下载到自动驾驶仪里。不过，部分系统仅在无人机停留在空中时才接收下载。然后，在手动操作无人机起飞或手动飞行一段时间后，自动驾驶仪就能够随时执行程序中的指令。

操控人员可以手动在表格中设定每个中继点的坐标，不过，使用软件提供的飞行类型方案会让这一过程更加简单。下面看几个预设自动飞行计划的例子。

以拼图方式拍摄地貌

设想一下，你希望在空中垂直拍摄一块土地的地貌，但是，无人机的飞行高度无法在一张照片中囊括整块土地。解决方案如下：在垂直方向上以同样的覆盖率拍摄这块土地的不同部分，然后把所有照片拼凑起来。为此，无人机应该沿平行的直线飞行，到达土地边缘处掉头返回；在飞行过程中，无人机到达预设的中继点，拍摄照片。

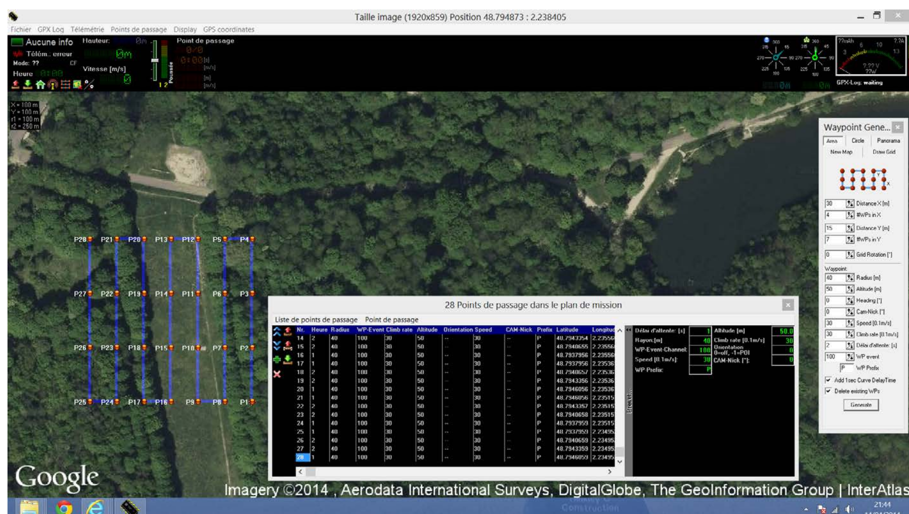


图 4-4　用“微型飞行器工具”（MikroKopter Tool）软件准备在东西方向土地上进行拼图式拍摄飞行，有 30 个中继点。飞行计划路线呈蓝色线状呈现在屏幕左侧，每个中继点的坐标在屏幕下方的表格中

只要在软件中明确出发点、中继点之间的距离、中继点的数量，软件会提供自带的类型计划。对旋翼无人机来说，还能设定每个中继点之间的等待时间。

用于无人机参数设定的软件让制定飞行计划更加简单。使用门翼公司的“速地”（Quickfield）软件时，只需要画出长方形、标明起飞点、降落点、高度、风向、相片之间的覆盖率（%），软件就会完成剩余的所有工作。

自动驾驶仪需要做的仅是模拟飞行。

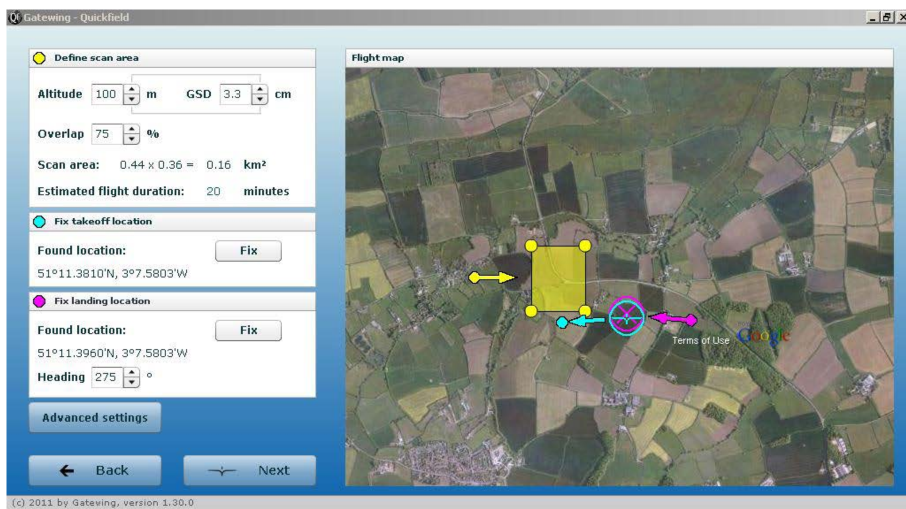


图 4-5　门翼公司的“速地”软件。黄色的长方形是要扫描的土地，箭头指示的是起飞点和着陆点，白色表格呈现飞行数据

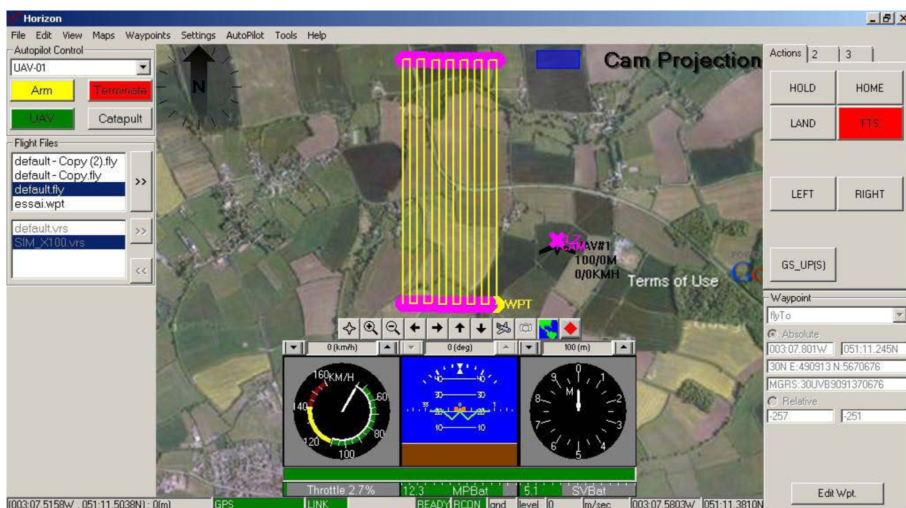


图 4-6　所得飞行计划。粉红色点是无人机需要沿着飞行的中继点（通过黄色线连接）

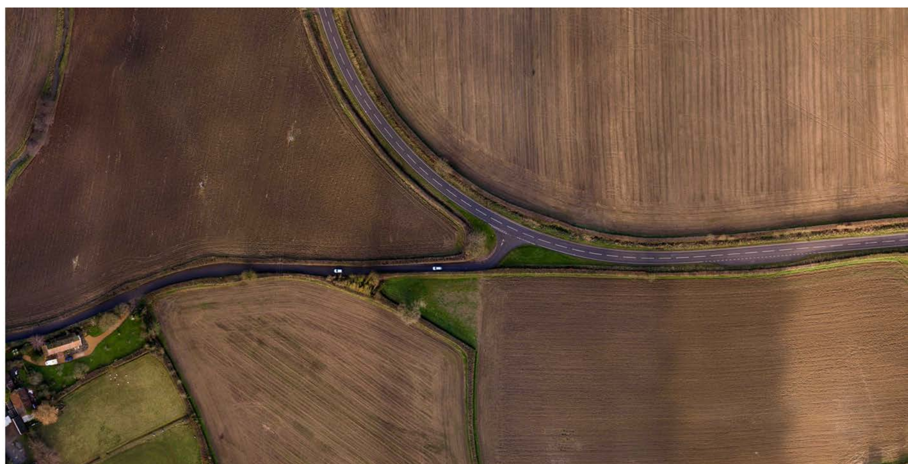


图 4-7　最终结果：220 张照片组合成的高清图像

拍摄房屋的外表面

想象一下，如何从不同角度为自己的房子拍摄照片。使用无人机拍摄时，需要把房屋作为圆心，在保持机载相机始终对着房屋的前提下，操纵无人机围绕房子飞行。在确定了飞行半径、高度、飞行圆心、中继点数量之后，电脑程序可以命令无人机围绕着圆心飞行。拍摄目标高度和无人机飞行高度如果出现差异，机载照相机会在垂直角度上自动调节（参见图 4-8）。

如果你希望围绕房子拍摄各种不同高度的照片，可以让无人机分别在不同高度环绕房屋，相机镜头保持朝向房屋拍摄。在设定好第一圈环线的参数后，其他环线都重叠在第一条环线之上，然后设定不同飞行高度，分开这些环线。

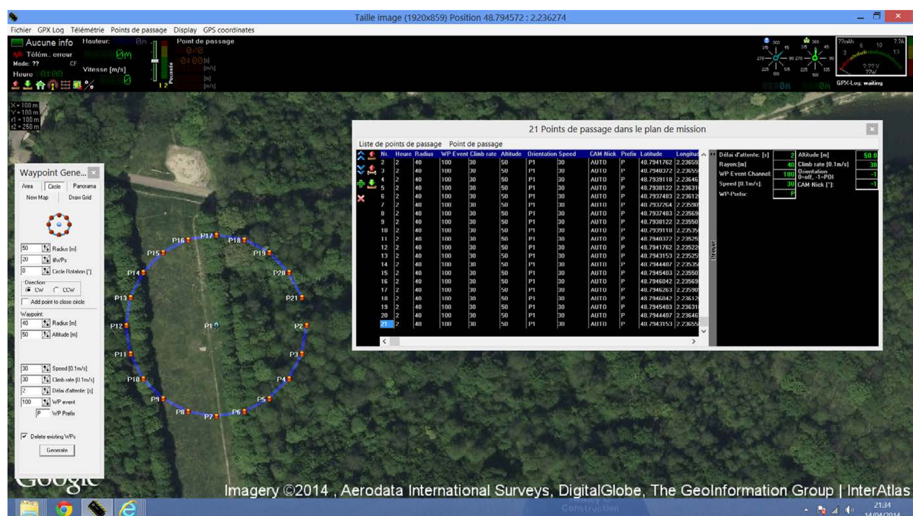


图 4-8　有 10 个中继点，并围绕中心点的环形飞行计划

拍摄全景

你一定用过照相机的全景拍摄功能，其原理是：在一点上朝不同方向拍摄一系列照片，覆盖全景。无人机非常适合这种任务，无人机在空中悬停，沿中间的轴线转动拍摄照片，每两张照片之间的拍摄间隔相等。电脑软件可以辅助完成这项任务，只需设定悬停的中继点和需要拍摄的照片数量即可。

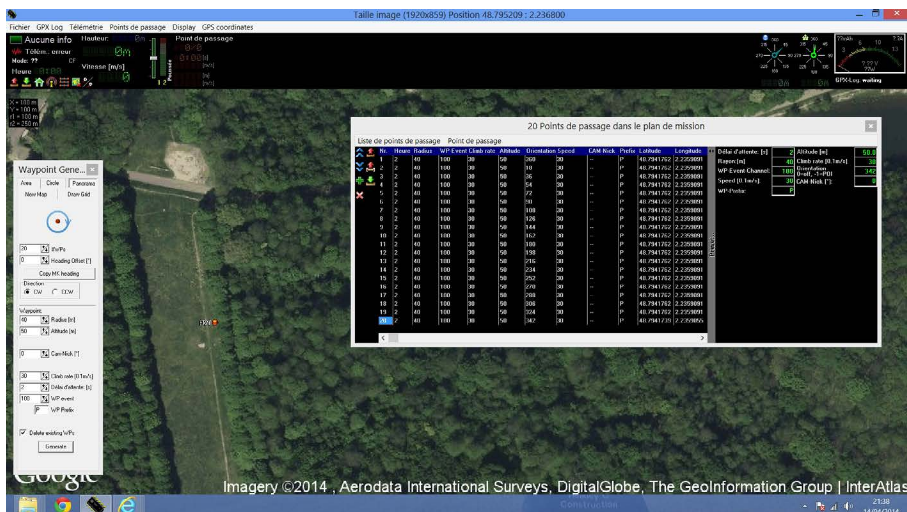


图 4-9 拍摄 20 张照片意味着角度每转 18 度拍摄一张照片，足以覆盖全景



图 4-10 在距离地面 50 米处用 20 张照片拍摄的默东树林全景

其他飞行模式

前文提到了无人机的主要飞行模式，此外还有其他的次要飞行模式。

跟随模式

无人机可以跟随地面上装有全球卫星定位系统的发射器所发出的信号。所以，无人机可以自动跟随汽车、船只和地面上的行人。注意，这种模式会对地面上的人构成安全威胁。

花样飞行模式

无人机可以连续呈环形飞行、上下颠倒飞行、侧滚飞行，还可以做出预先设定好的各种花样动作。无人机可以单独或编队表演，当然，在进行花样飞行时不要放置实用载荷，而且要保证足够的飞行高度。

模拟飞行

你已经准备好用无人机飞行，但不确定飞机的续航时间能否足以完成任务。你还想确认无人机在绕过障碍物的同时保持最短路线，防止过度偏离航线。这时，你可以模拟飞行，在软件上演示沿设定飞行路线的行进过程，而且，程序还会考虑到各种因素，如无人机转弯半径、上升速度、风力、电力消耗等等。模拟飞行是防止坠机的切实保障，对于固定机翼无人机来说更是如此，因为其转弯半径很长。

如果无人机不能在一次飞行中完成全部任务，还可以分若干次完成。于是，一家印度尼西亚企业为了计算棕榈树数量，让无人机每次飞行 1 公里，分 25 次飞行，完成了对 25 平方公里地面的拍摄工作。

如果飞行计划更加精密，无人机可从头至尾自动完成由一系列飞行任务：无人机自动起飞，完成预先设定的飞行任务，然后自动着陆。无人机也能首先由操控人员手动起飞，然后开始自动飞行，在降落时再由操控人员手动控制无人机着陆。

飞行控制与实用载荷

无人机进入飞行阶段后，软件的图形界面会实时为操控人员提供三种参数：



图 4-11　模拟在 150 米高度以 80 公里 / 小时的速度飞行，转弯倾斜度为 30 度

- 屏幕的中心区域在类似谷歌地图的微型图像上提供无人机的实时飞行轨迹，操控人员可以检查是否符合飞行计划；
- 屏幕的第二片区域显示无人机的各种实时飞行参数（速度、航向、高度、电池状况等），这片屏幕区域模仿了飞机上的仪表盘，配有各种仪表和飞机姿势仪；

- 屏幕的第三片区域显示按钮，可以点击按钮下达命令，或者是数字区，填写数据后改变飞行高度、命令无人机等待、暂停飞行、命令无人机返回……有些命令不能撤销（比如终止飞行），执行前需要得到操控人员的确认。

即便没有事先制定飞行路线，也可以在屏幕上移动鼠标，或者在触屏上直接点击中继点，遥控无人机向该中继点飞行，并在到达后等待新命令。

照片数量、时间、地点、方向、地面拍摄控制等信息也会显示在控制台上。

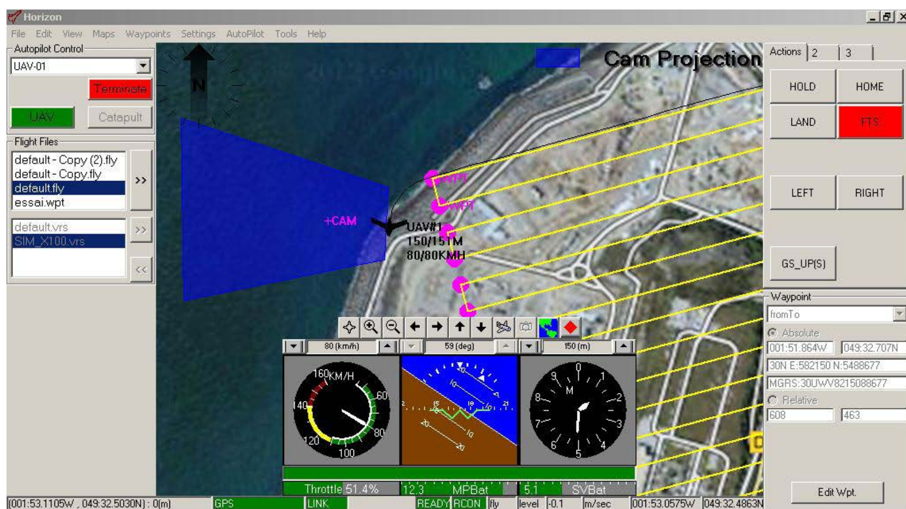


图 4-12　蓝色梯形部分代表无人机向左转弯时拍摄照片所覆盖的地面范围

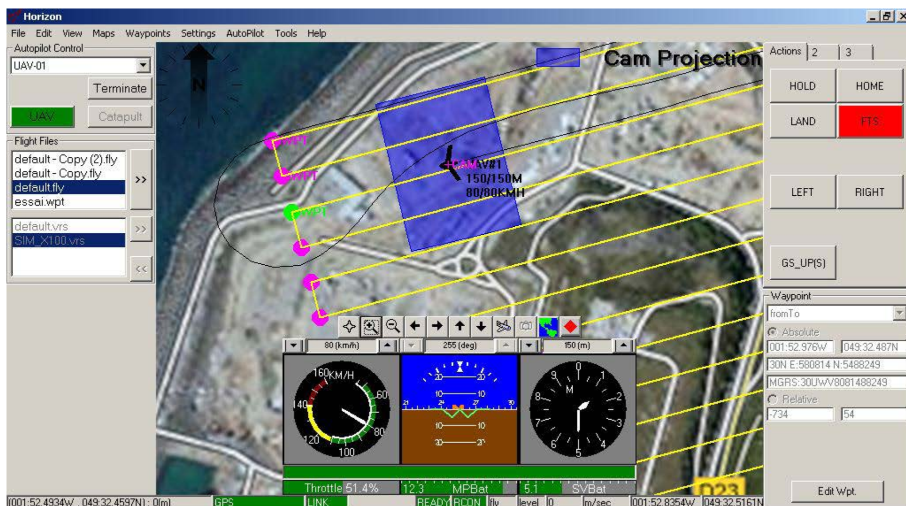


图 4-13　在 150 米高度平面飞行时，拍摄照片所覆盖的地面范围大约 1 公顷，呈长方形

依靠上述各种自动模式，操控人员的工作更多是监控重要的飞行数据、监督飞行，而不是直接操纵无人机。

无人机失去控制联络或者失去全球卫星定位系统连接

自动飞行时，无人机可能会在短时间内飞到障碍物（树木、山丘）后边，在这种情况下，无线电联系会被阻断。此时，可以通过程序设定，允许无人机在一定时间内接收通信中断的情况，超过时限之后，返航程序将自动启动。

飞行时的电池电压

靠电力驱动的无人机续航时间有限（平均来说，携带实用载荷的多旋翼无人机续航时间不足 15 分钟，固定机翼无人机续航时间不足 1 小时）。无人机开始飞行后，电池电压下降：必须在电池彻底放电完毕前终止无人机的飞行，否则会失去电池（电池完全放电后会发热，最终无法使用），或者失去无人机，甚至同时失去两者。无人机在上升阶段最耗费电池。一架六旋翼无人机在启动时显示电压为 16 伏，在上升 100 米后，悬停时显示的电压为 14 伏，之后电压恢复少许，达到 14.5 伏，然后电压逐渐下降。如果飞行时间总计 15 分钟，除去起飞与降落之外，有效飞行时间——即操控人员操作实用载荷拍摄照片的时间大约仅有 10 分钟。所以，留给找到一个或多个拍摄角度、取景和按下快门等一系列行动的时间所剩无几。任务繁重，人们很容易忘掉时间！幸好大多数无线电都配备秒表，在无人机引擎启动之时开始计时，在达到规定时间后响起警报。在无人机起飞前，操控人员应该在脑海中思考片刻，预想将要进行的操作，避免正式操作过程中因犹豫不决而浪费时间。有经验的操控人员会充分利用时间，在飞行的各个阶段都保持实用载荷指向拍摄目标的姿势，比如在无人机逐渐远离拍摄目标时采取倒退飞行。而且，还应该采用最短飞行路线，避免无效转弯。

当然，如果有一位助手负责取景，协同监测接收到的视频影像，并用另一个遥控器控制实用载荷在三个轴线上的活动，那么工作效率会大大提高。任务开始前，一定要检查机上实用载荷是否过重：对于无人机来说，重量是续航时间乃至飞行安全的最大敌人，必须卸掉任务不需要的多余负荷。

操控人员必须留出一段时间应对无法预见的突发事件，并时刻谨记：在强风天气下，时续航时间会减少。因为，无人机想在强风中保持悬停状态，引擎要加大功率，而且无人机在风中完成相同飞行距离所需时间更长。在高处的风力总是比在地面上更强，所以风力发电机的桅杆总是尽可能地伸长。另外，低气温也会影响电池性能。因此，操纵无人机时宁可把任务分为几次完成，也不要冒险在一次飞行中毕全功于一役。

严格遵循飞行计划，远离其他飞行器

在自动航行模式下，操控人员要保证严格遵循飞行计划，同时注意监视导航地图软

件。如果无人机偏离航线，操控人员应立即介入，切换成手动操作模式。如果仅专注于显示屏，没有亲眼看到是否正确操作，可能会犯下致命错误。

同时，还要保持警惕，防止和其他飞行器相互影响：多国法律规定无人机必须在低于150米的高度飞行，其他大多数飞行器往往在超过150米高度的空中飞行。尽管如此，无人机还是可能在低空遇到直升机、滑翔机、山崖跳伞、热气球……所以，操作无人机时旁边必须有“观察者”的协助。

自动航行模式的危险

让自动驾驶仪控制飞行可能潜藏风险：

无法检测出机械故障

手动控制时，如果舵或旋翼发生故障，导致无人机表现异常，操控人员可以立即察觉并命令无人机降落。而在自动航行状态下则难以检查出上述问题，自动驾驶仪平稳运行的状态很容易掩盖这些故障，最终导致无法挽回的后果。因此，无人机必须在手动控制时经过一系列核查后才可以开启自动航行模式。

传感器错误

举一个例子：无人机需要通过检测大气压才能保持飞行高度，也就是说，需要依靠等压线。但是由于大气压力的变化，飞行过程中等压线也产生相应变化。对固定机翼无人机来说，具体表现是降落时不够精确：无人机很可能降落在预定着陆点前方或者后方15米。

全球卫星定位系统信号切断

无人机的大多数飞行模式都要依靠全球卫星定位系统发出的信号。无人机接近障碍物或山峰、山谷等地形时，信号质量会受到影响。无人机可能会接收到多路传播导致的错误信号，比如同时收到卫星直接发送的信号和障碍物反射的信号。在信号切断的时候，无人机开始偏离航线，直到重新收到信号后才能返回预定航线，继续飞行。

未能检测到障碍物

如果没有装备“视觉闪避”或者“传感闪避”装置，无人机就成了一台盲眼机器。无人机只会一直飞行下去，直至撞到山体、飞鸟、其他飞行器，或者坠落到地面。

输入数据错误

输入的数据决定无人机的飞行质量：飞行计划、地理坐标、海拔高度。海拔高度是否正确？谷歌地球（Google Earth）是否采用了最新版地图？在一些偏远地区，地图可能每十

年才更新一次。制图者承认这些地图在某些地方可能有几十米的偏差。谷歌地球拒绝承担任何责任，公开表示其地图不可以为任何交通工具提供参考。而大多数无人机都使用谷歌地图。更糟糕的是，假如操控人员疏忽大意，照搬上一次在数百公里之外执行任务时采用的飞行计划执行本次任务，将会发生什么？恐怕无人机将一去不复返……

警惕性降低

和观众在飞行表演上对自动航行模式感到厌倦一样，操控人员也会放松注意力，在出现问题需要恢复手控时反应过慢。

自动航行模式是非常重要的助手，对某些任务来说甚至是必不可少的，但是，操控人员不能完全依赖这种模式。操控人员需要时刻警惕，严格按照检查清单上的要求去做，包括查看无人机状态、核对输入数据。操控人员还应该仔细观察周围环境，在出现突发状况时马上做出反应。

最后，在任务结束后，操控人员应该分析飞行参数。

分析飞行参数

机上传感器的测量记录都储存在小型安全数码卡上，以便在任务完成后进行数据分析。下边是几个例子。

航线分析

航线可以在三维谷歌地球上以 .kml 格式读取。



图 4-14 “天宝 X100”固定机翼无人机转弯时地图上的记录，可见规则的飞行轨迹



图 4-15 “电影明星 6”六旋翼无人机的飞行轨迹：上升到 100 米空中，在 40 米和 80 米处悬停

谷歌地球的作用

凭借“编辑 / 展示”投影图功能，谷歌地球呈现地貌距离与海拔。

其他传感器分析

分析飞行数据在无人机整个使用寿命期间都大有裨益。

- 初次使用时，调节无人机。
- 使用一些应用功能时，飞行数据可以和实用载荷的数据关联。比如在拍照时，将照片的数码数据与飞机各轴线上的海拔相关联，可以用来校正环幕照片。可以通过无人机上的全球卫星定位系统把照片作为地理参照。
- 查明某次行动的错误、坠机等问题时，可以在屏幕上重现任务。而且，还可以暂停画面或者回放画面。
- 筹备下次任务时，已经完成的飞行计划可以作为新任务的录入数据，比如在同一地点于不同时间拍摄照片。



图 4-16　分析一架 Arducopter 四旋翼无人机在飞行中的震动情况。横坐标代表时间，红色曲线和绿色曲线代表水平方向的震动（X 轴与 Y 轴），蓝色曲线代表垂直方向的震动。震动强烈的部分在着陆时产生

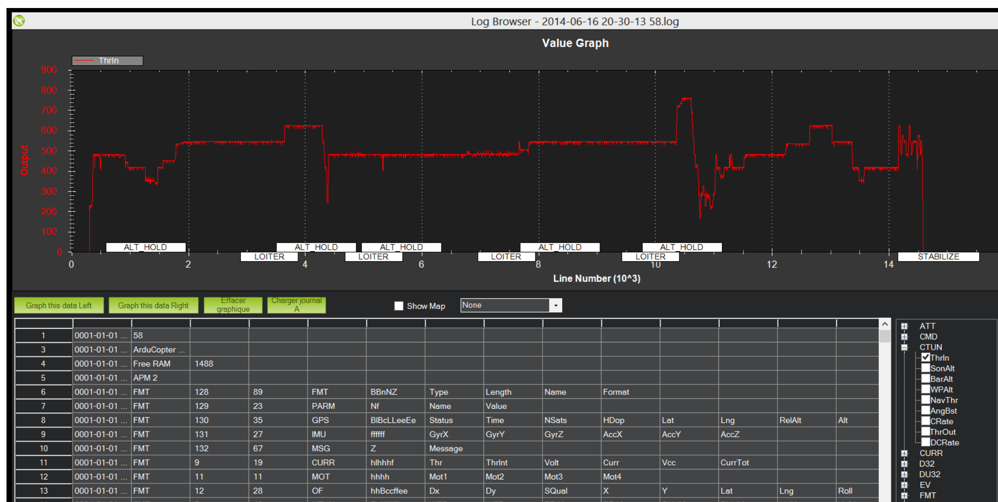


图 4-17　分析悬停时的动力情况，目的是检查是否出现动力不足或动力过大的情况，功率在 40%~60% 为正常

第五章

无人机有哪些用途?

“一个人回顾过去之时，他垂下眼睛俯视大地；一个人展望未来之时，他抬起双目仰望天空。”

——亚里士多德

无人机的用途是什么？无人机最主要是用于拍摄令人叹为观止的照片和视频。仅从职业应用范围看，无人机可用来直接远距离监视紧急或者危险的情况，另外，无人机还能在测量地形、描绘地貌领域发挥巨大作用（制作地图、等高线、数字表面模型）。而且，只要根据需要更换合适的实用载荷，无人机同样可以被应用到其他新兴产业，尤其在农业和环境领域。当所有企业家都使用无人机进行建筑物日常检查的时候，无人机产业将迅速蓬勃发展。除了这些通常的用途之外，可以说，无人机的应用潜力几乎无穷无尽。本章的目的并非一一列举出无人机的所有用途，而是筛选其主要应用介绍给读者。

媒体应用

民用无人机起初用于拍照和视频通信，这种应用始终是市场主流。

航拍摄影

航拍摄影是无人机的最简单应用。高处的视角激发了航拍摄影大师亚恩·阿蒂斯–贝特朗（Yann Arthus-Bertrand）的灵感，让他知道如何把拍摄对象纳入环境之中。这种照片能够以最佳角度完美展示大型地产、工地、公园。所以，房地产中介、广告商、旅游业人士、记者对航拍照片情有独钟，即使是普通个人也对此兴趣盎然。那么，航拍摄影中应该使用何种器材？如何使用器材？可以获得怎样的效果呢？

使用何种器材?

为了拍摄到高质量的照片，一定要把拍摄目标完美地摄入镜头，所以要根据不同的任务采用能够在空中悬停的各种飞行器，如多旋翼无人机。



图 5-1　使用 GoPro 照相机在 150 米高空拍摄的英国西南部村庄康维治

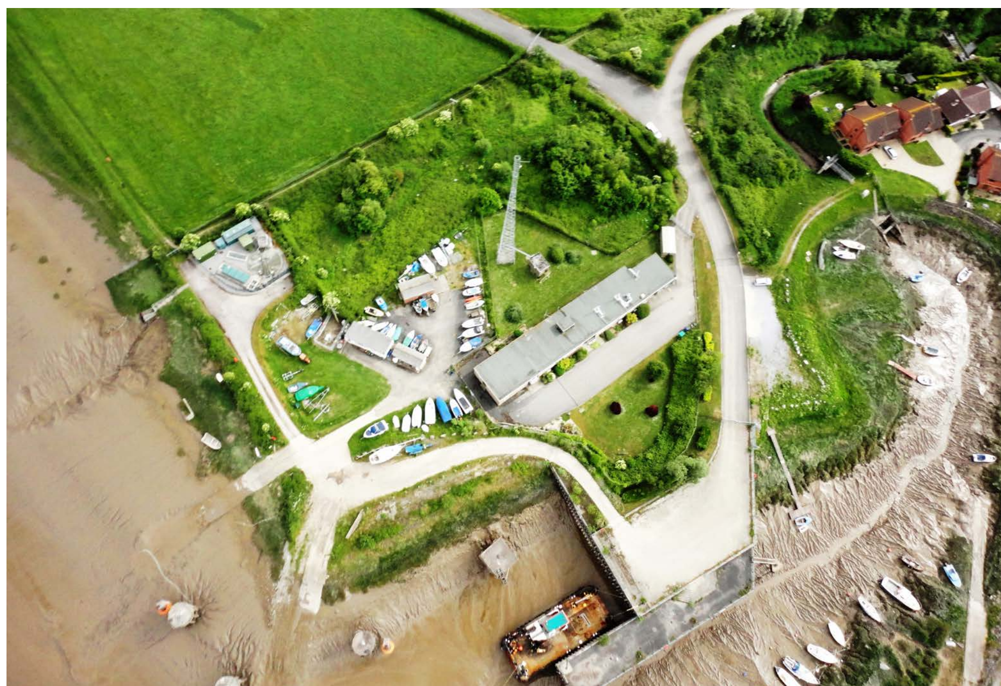


图 5-2　在同一次飞行中没有使用鱼眼镜头拍摄的另一张照片：居高临下的感觉变弱

携带照相机的吊舱应尽可能保护相机不受颠簸震动的影响。虽然无人机为摄影师提供了全新的自由空间，但是，远程操控快门也为拍摄带来了不便，摄影师必须在无人机起飞前调整好相机。而且，拍摄之后对相片进行加工，也是提高质量的必要步骤。和所有风景照片一样，优先考虑使用广角镜头（焦距小于 25 毫米）。焦距越短，高度感越强烈。GoPro 相机上的鱼眼镜头（3 毫米）拍摄的地平线呈圆弧状，仿佛照片是从太空中拍摄的一样！这种广角镜头相机性能与重量的功效比十分理想，受到众多无人机使用者的青睐。

照片风格：垂直、斜下方 45 度角、呈现出地平线

只要移动一下遥控器上的手柄，吊舱会从上向下移动。如此方便的操作可以让相机根据各种需要在垂直方向拍摄照片。拍摄时，0 度是垂直轴，90 度是水平轴。

垂直拍摄的照片

用广角镜头拍摄的垂直照片时，由于法律许可的最高拍摄高度是 150 米，地面拍摄范围不到 2 公顷，所以只适合面积相对较小的拍摄目标。取景必须准确，只有让无人机在拍摄目标中央上空拍摄，然后，让无人机沿着垂直轴旋转，以便让拍摄图形与相机规格一致。无人机飞行续航时间有限，上述操作非常费时。垂直方向拍摄照片，高低起伏完全平面化，物体的自然形状变得抽象。通过照片中可以辨认的物体（汽车、树木、船只……）能够估计画面的比例尺。



图 5-3　挖掘现场，照片中的水呈现青绿色。通过照片右侧下方的公路和车辆可以看出比例，照片拍摄于 150 米高空



图 5-4　一栋小房子的建筑现场，在完全垂直的 50 米高度拍摄

为避免对人身或财产带来危险，应禁止在拍摄目标正上方飞行；或者，如果拍摄目标过大，无人机在垂直上方无法将其完全摄入镜头，应该环绕拍摄目标飞行，并从倾斜角度拍摄照片。

45 度角俯视照片



图 5-5　建设中的天然气工厂，在 100 米高度拍摄。照片本应该展示塔吊上方空间，以表明这张照片不是在一座塔吊尖上拍摄的

无人机以 45 度俯视视角面对拍摄对象，给人的感觉如同在自家阳台上稍稍向下俯身的效果。在 100 米以上的高空，照片能够拍摄到的地面面积比在垂直上方增加十几公顷。所以，读者应该很容易理解，为了在拍摄目标 100 米高空拍摄 45 度角的俯视照片，无人机需要后退 100 米。

70 度到 80 度角俯视照片，照片中出现地平线

70 度到 80 度角俯视拍摄时，照片中可以看到地平线，很容易自我定位：拍摄结果和在舷窗看到的景色类似。地面平坦的情况下，拍摄所及范围可以达到十几公里。有时候，雾气可能让地平线模糊，甚至完全消失，因此这种照片最适合在干燥天气条件下拍摄。

建议：正确取景

注意，照片中天空比例不应过大（最大三分之一），尤其注意不要拍摄到旋翼！无人机为了对抗前方向吹来的强风或者需要前进时会严重倾斜，可能会拍摄到旋翼。因此，拍摄照片时应后退足够的距离拍摄，至少 200 米。

照片拍摄的地面面积广阔，拍摄目标很容易迷失在背景中。这时，用画图软件在照片上标出拍摄目标，就能帮助观看者辨认出拍摄目标。



图 5-6　70 度俯视拍摄：用红色醒目地标出建筑用地的地块边缘

拍摄照片时如何调整照相机？

在冬天，太阳距离地平线较近，空气潮湿，自然景色暗淡无光，这是最不适合航拍照片的时候。不论什么季节，都应该等到太阳升起足够高度的时候拍摄。追求完美的摄影师

认为拍摄的最佳时段应该在 10 点到 16 点之间。

无人机升空后，就无法调整照相机的各种参数。最常见的问题是因移动造成拍摄的照片模糊不清。与平稳安装在地面三脚架上不同，照相机在无人机上需要经受移动与颠簸。因此，应该事先进行试验，采用最慢的快门速度，保持拍摄的照片清晰，不会因为移动而出现模糊。通常情况下，对广角镜头来说，快门速度至少要 1/400 秒；变焦镜头且在 S 模式下（快门速度优先）的快门速度为 1/2000 秒。考虑到照相机和地面的距离，不需要使用景深功能，因为照相机会把距离调节到无限远。

建议使用偏振镜，因为偏振镜可以让天空的颜色更加鲜亮，而且能去除大部分的水面反光。

和 .jpeg 压缩格式的照片相比，.raw 格式的照片能够容纳更大量的数据。人们优先使用 .raw 这种专业格式的照片进行航拍摄影，因为拍摄的照片往往需要修图。我个人同时使用两种格式的照片，鱼与熊掌兼得——.jpeg 格式照片速度快，.raw 格式照片可塑性强。

每次飞行前，最需要注意的是清理镜头，以免上次降落时沾染的晨露或些许灰尘糟蹋了这次拍摄的所有照片。理想的情况是，在起飞地准备一个工作台，比如露营桌子，保证所用装备的整洁。

专家建议

- 由于光线原因，最好在中午拍摄照片；
- 选择高速快门速度，以避免照片模糊；
- 使用偏振镜，让照片颜色鲜明亮丽；
- 根据需要选用照片格式，.jpeg 格式照片速度快，.raw 格式照片可塑性强；
- 仔细清洁镜头。

充分利用云层



图 5-7　在英国沿海地区，响晴的蓝天非常少见，幸好可以利用云层间隙投射下的阳光照亮这片工地

阳光充足的时候，地面上的阴影能够增强明暗对比，更容易看出地面景物的外形。不过，逆光拍摄会彻底毁坏航拍照片。如果必须要面对太阳逆光拍摄的话，最好等待云层经过时拍摄。

然而，云层有时会增加拍摄任务的困难：零散云块下的阴影有时会导致地面上明暗斑驳，需要在后期制作时修图，淡化这种效果。使用无人机拍摄照片时，可以利用云层缝隙投射下来的阳光，当阳光照到拍摄目标时启动快门，利用自然赋予的光线拍照。

后期制作中的照片编辑

摄影师仅仅有几分钟的时间稳定无人机、取景、启动快门。出于外界干扰等原因，视频回传的质量有时可能不太理想，不要期望所有照片都会非常成功。最好能拍摄大量照片，增加拍摄到高质量照片的几率。然后，用 Adobe Lightroom 一类软件进行调整，以提高照片质量。

照片中很难保证地平线的平直，可以用 Lightroom 软件的“调整角度”功能修改，但照片的四角会被修掉。

如果拍摄目标没在照片中央，通过修改边框的方法很容易解决这个问题。

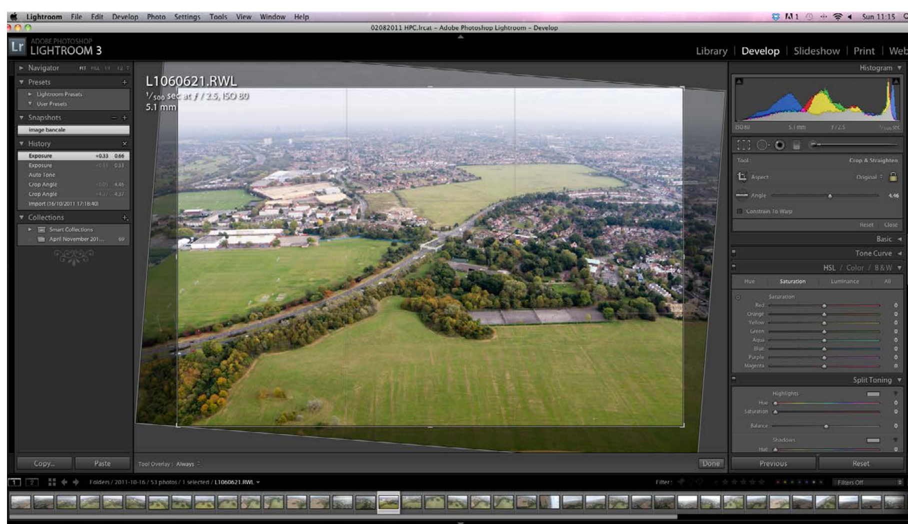


图 5-8 使用 Lightroom 一类的照片编辑软件，修改照片非常容易

如果远处雾气导致照片颜色灰暗，可以调高对比度解决问题，让颜色饱和，通过使用渐进水平方向的滤色器略微降低曝光度——照片细节清晰呈现。

视频

无人机非常灵活，可以跟随俄罗斯索契冬奥会的滑雪者、环法自行车赛的自行车手进

行直播，还可以紧贴各种名胜古迹上下拍摄。无人机操控人员拍摄过照片之后，一定希望拍摄视频，让无人机充分发挥作用。而且，我们建议从无人机第一次飞行开始就使用视频拍摄功能，以判断吊舱稳定性和震动程度。

稳定图像

要知道，拍摄优质的视频并非易事，首要的原因是摄像机不断在晃动，有两种方法可以稳定摄像机。

- 从根本上解决问题，使用陀螺仪稳定吊舱，实时调整吊舱的运动。吊舱的最大行程和运动速度都应该仔细地调节：不能过大不能过小，不能过慢不能过快，不能突然停顿。如果要改变实用载荷，由于惯性改变，往往需要重新调节。
- 在后期制作时，可以用苹果公司的 iMovie 或者 Adobe Premiere Pro 等软件改善视频质量。

另外还要注意天气，没有风的天气里易于稳定摄像机。

学习在运动中取景

在操纵无人机的同时控制摄像机（对准拍摄目标、推进镜头、拉远镜头），类似驾驶汽车的同时拍摄视频。理想的状态是，由不同的人分别负责者两项任务：取景者用遥控器在三条轴线上控制摄像机、推进或拉远镜头；操控人员负责控制飞行并监控无人机的状态。两个人之间必须保持沟通顺畅，实践中，无人机操控人员要听从取景者的命令。另一种方法是，在某些阶段实施自动驾驶。操控人员在飞机自动驾驶时控制摄像机，切换回手动状态后，返回遥控无人机的岗位。无人机在自动飞行时一定要远离障碍物。

你将会发现，取景工作也是苦乐参半。在移动的飞行器上，对准目标拍摄非常困难！摄像机面对的方向应该与无人机移动方向相反。比如，随着无人机慢慢上升，应该让摄像机拍摄方向逐渐向下，始终让拍摄目标位于镜头中央。无人机上升时，摄像机相对于拍摄目标的角度逐渐垂直。当无人机沿着拍摄目标向右侧飞行时，摄像机应该先指向无人机前方，之后指向左方，最后指向无人机后方。在空中时，人们很喜欢 360 度角拍摄，呈现出整体的全景。但前提是飞行速度应当始终缓慢而恒定，同时保证能够看到地平线，否则会使人头晕目眩。使用无人机拍摄视频时，需要先在开阔的领域练习，把地面上的物体作为参照物。只有在无人机悬停时才可以推进或拉远镜头。虽然多旋翼无人机速度相对较慢（低于 50 公里 / 小时），有时，为了让拍摄的影片具有速度感，需要飞近目标拍摄，或者把摄像机指向地面的同时低空飞行。

用无人机拍摄运动比赛时，可能会给观众带来不可小觑的危险。一旦出现故障，无人机必须保证能够在空旷地带紧急着陆。在非直播拍摄的情况下，后期加入音频解说、文字、音乐等剪辑编辑工作会让视频更加精美、专业。

在媒体应用领域，无人机代替了其他工具。

- 伸缩杆：可伸缩但不能移动，高度通常不会超过 20 米，笨重而且难以操作，因此，伸缩杆通常需要固定在车辆上。
- 直升机（费用昂贵）或者滑翔机（无法低空飞行，不能空中悬停）。

现代数码照相机和数码摄像机拍摄质量优秀，很难确定在低空拍摄的画面是来自无人机还是直升机。

监控

接收视频对于媒体应用来说属于次要功能，却是无人机发挥监控功能至关重要的因素！

无人机监控某一区域时，通过视频传输观察监控区域环境，把监控视频实时传送给地面——无人机的作用如同可移动的望远镜。监控目的是获取紧急事件演变的最新信息，比如火灾、车祸、劫持人质……对无人机监控功能最感兴趣的是国家的各个安全机关，如警察、宪兵、消防部队等。此外，其他机构也需要无人机的监控功能：法国国家铁路公司防止铁路沿线电缆被盗，人道组织对抗偷猎珍稀物种行为、保护自然保护区……监控画面可以由在场相关人员查看，也可以远程传送到指挥中心。监控画面可以作为决策依据——评估现场状况、预计事件发展、与地面协调合作。

监控无人机

用于监控的无人机是多旋翼军用无人机的民用版本。对于大多数在陆地上的应用来说，监控无人机需要在监控区域上空悬停，旋翼更加适合执行这种任务。监控任务需要对目标进行持续监视，民用电动小型多旋翼无人机很难满足需要，因为它们的续航时间通常都少于 30 分钟。但此类无人机的优势在于噪声小、非常隐蔽。装备了热引擎的无人机续航能力超过 1 小时，比如信息创公司的 IT180 无人机，完善了法国 Intra 集团（该机构负责核能事故的初步维修工作）的机器人系统。监控国境线和海岸线的任务需要长途飞行，所以由固定机翼无人机承担。国境线长、边境不安定的国家越来越频繁地使用固定机翼无人机，比如俄罗斯、以色列和印度等国。

实用载荷

实用载荷是一台可以调节焦距的摄像机，通过两种方式稳定图像：以陀螺仪稳定摄像机；或用电子手段，几乎做到实时稳定视频。为了突出颜色对比，图像往往仅有黑白两色，尤其在照明条件差的情况下更需如此。晚上有时会使用红外线摄像机。这种摄像机会生热，所以，为了保证摄像机持续正常工作，需要配备冷却系统。协助监控的软件会锁定目

标（人或者车辆）、确定方向、测量距离、定位，然后，软件将移动镜头自动跟随目标。必要时，软件会移动无人机追踪目标。



图 5-9　无人机自动锁定并跟随车辆

一些地方对人类来说存在生命危险，无人机就显现出了优势，可以安全前往并发送回所需信息。因此，法国朗德省的消防员尝试使用无人机应用系统，让无人机停在森林大火上方，实时传送燃烧的火线图像。

普通摄像机或者热成像摄像机还能辅以探测放射性污染和化学污染的传感器，用来探测各种各样的灾难事故。让无人机携带传感器前往不同地点，能够实时建立灾难蔓延状况的地理分布图，不必像以前一样等待几个小时获得摄影测量的结果。无人机发送回地面的照片和视频能让人们及时掌握整体状况。

民用无人机执行监控任务的局限

无人机执行监控任务的潜力巨大，然而目前仍处在试验阶段，因为这种做法也存在巨大的不足。

- 无人机必须与其他空中飞行器协调配合，因为无人机可能会阻碍直升机前往受灾地区救援。
- 无人机续航时间短，操控人员需要尽可能靠近目标地区，然后才能让无人机升空。

但是在地震、疫情、火灾等灾难爆发的情况下，必然禁止人员接近受灾地区。所以，和传统直升机相比，无人机在路上花费时间更长。无人机续航时间短一直是其主要缺陷，因此，目前不能执行长时间任务。除非同时拥有若干架无人机，可这种方法价格不菲，且耗费人力。

- 无人机在某些天气状况下无法飞行，需要等到风力下降的时候才可以使用，有些时候，风恰恰是导致自然灾难的元凶。
- 大多数飞行器的使用法令规定，不论是军警还是其他使用者，严禁用飞行器监视他人。英国警方曾经出于追踪需求购买了一批微型无人机，却因使用条件过于严苛，只好放弃……

无人机的全新使用方法不断出现，比如在地震、海难、雪崩之后利用无人机搜寻幸存者，并用无人机运送食物、药品、救生圈等急救物品。或许，我们有一天会看到无人机“搜救犬”呢！

农业与环境

人们通常认为农民不喜欢新鲜事物，不愿意多花钱。实际上，农民同样使用无人机——在 2013 年的法国农业博览会上，农民使用无人机的新闻轰动一时！

在农业领域，无人机可以应用于：

- 判断一片土地的生物量情况；
- 喷洒药物。

一片农田的土地质量并非完全一样：同一片农田某些地方土壤贫瘠，植物缺乏生气；而其他地方土壤肥沃，植物蓬勃生长。这种区别在农业上的表现就是同一片农田不同区域的产量不同，农民用施加化肥的方法平衡各个区域的产量。大型谷物种植农场采用精准农业种植，通过全球卫星定位系统进行肥料农药等资源的精确分配。但是，如何在田地里分配资源呢？时至今日，人们仍然大多采用取样分析法，在农田各处取回植物样本后，拿回实验室分析，最后得出结论。但取样的数量必定有限，因为取样过多浪费时间和金钱，而且，有时取样的地点也不适合。实际上，还存在另一种方法评估植物的健康状态：检测反射率，也就是说，检测植物反射的肉眼不可见波长的光。要进行这种检测必须使用多光谱传感器（红外线、绿光、红光），然后用假色为照片上色，并与农业学模型相关联。拍摄所有土地的最佳方法是航拍，因此，无人机能够在此大显身手。

大片没有障碍物的开阔农田，是续航时间长的固定机翼无人机的理想飞行场所。无人机上的传感器是一种由若干传感器组合而成的特殊照相机。

处理画面

照片被组合拼接，屏幕表面相应被分成若干小块，每一块都指示应该撒播氮肥的量。这些数据被输入软件中，软件控制无人机所携带的化肥分配装置。分配装置依据全球卫星定位系统分配喷洒化肥。

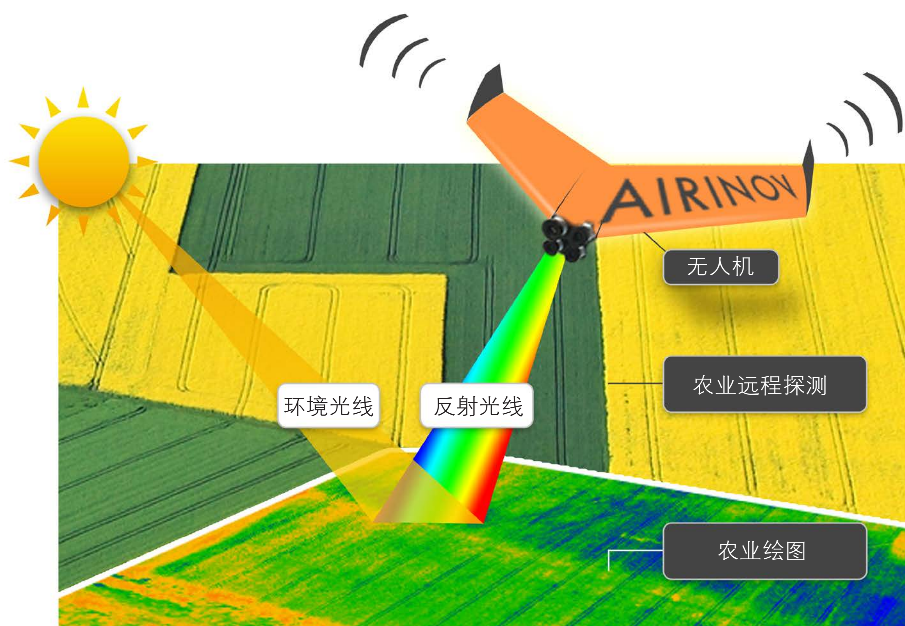


图 5-10　天空革新公司无人机根据反射率进行检测的原理

对于农民来说使用无人机具有双重优点：

- 节约化肥；
- 产出率提高，产量增长。

喷洒作业

为了避免空中喷洒作业造成土地污染，法国遵守欧洲的统一法令，严禁空中喷洒作业。然而，根据具体情况，可以特别允许某些空中喷洒作业。农业还没有彻底摆脱空中喷洒作业，在陡峭山坡和难以到达的土地上，仍采取这种方式喷洒硫酸铜为葡萄树杀菌，或者允许从空中向农田喷洒杀虫剂。直至今日，在法国，这类工作由五十多架配有专业设备的直升机和飞机完成。在美国中西部地区，空中喷洒作业的应用最为广泛，使用的是单引擎小型的黄色飞机，驾驶舱非常靠后，一旦发生坠机事故，这样的位置能够最好地保护飞行员。喷洒作业的坠机事故一直很多！完成空中喷洒作业，要求飞机的飞行高度至少达到

20 米，这种高度非常危险。用无人机代替普通飞机的话，优势会很明显：万一坠机，不会造成人员伤亡；而且无人机喷洒量更加精准，对环境影响较小。

日本是用无人机实施空中喷洒作业的发起国。从 20 世纪 90 年代开始，日本用这种方法缓解农村劳动力稀缺的压力。喷洒作业需要团队合作，一名操控人员操纵无人机，一名观察者站在农田边缘，防止无人机越过农田边界。后来，日本的近邻中国和韩国也开始使用这种方法。由于销售控制严格，空中喷洒所需的设备和无人机贸易都受到限制，因为人们担心恐怖分子或者军方用这种方法喷洒有害物质。另外，即使是最大型的无人机也只能携带数十升喷洒物，这种数量仅够小片土地所用。



图 5-11　在中国用无线电遥控直升机进行喷洒作业

普查植物群落与动物群落

在一些大型种植园中，比如以提取棕榈油为目的种植园，常常需要统计树木总量。传统统计方法需要在地面上进行，工作时间长，而且单调乏味。而航拍照片里的树木彼此之间分界清晰，统计比较容易，所以，无人机的此类应用前途无量。

为了保护物种（天然公园、保护区、沼泽）的生物多样性，科学家会定期对动物及其生存环境进行普查。这些工作往往要在人类难以步行通过的自然环境中进行，而且，人类的介入会对孤僻胆小的动物造成影响。使用电动无人机是一种不错的选择，无人机噪声小，而且二氧化碳排放量极少。

人工为照片上的动物或其他目标计数是一项乏味的工作。不过，大约十年前出现了一种可以根据照片识别外形并自动计数的软件，工作效果令人称奇，尤其在医学影像领域（比如，在显微镜下计算一滴血液涂片内的红细胞数量）和寻找信息材料组装缺陷方面的表

现更加突出。对于计数外界拍摄照片上的物体来说，这种应用目前还处在试验阶段，因为照片中的阴影和其他物体的图像会让数据计数变得非常复杂。

地形图测绘

建筑领域需要不断测量距离与体积：

- 挖土工人和工程策划人需要知道挖掘的土石量或者存放的土石体积；
- 项目经理需要估算包工队一周时间铺设的沥青长度，以便结算付款；
- 企业或个人铺设电线时应保证电线和周围植被保持一定的标准距离；
- 监测水坝防止决堤。

需要拿出尺子测量的情况绝不少见！传统上，地形测量员负责测量工作，在地面上以水平坐标（X 轴、Y 轴）和垂直坐标（Z 轴）为起点，拿着全球卫星定位系统接收器行走测量。这种方式决定了测量地点必须能够步行进入。但是，如果测量地点在陡峭的山坡上、布满挖掘机的工地中间或在沼泽之内，那么测量工作会变得充满危险，获得的数据数量也将受到诸多因素的限制：人员在不同地点间奔波、安装天线、查看全球卫星定位系统、记录数据，然后重复这一过程。如果测量数据较少，则需要通过推断才能得知体积，进而得到一个立体的地形图。测量数据越多，地形就越接近真实情况。

随着航空业的诞生，从空中拍摄照片测量的方法也应运而生，并已经用于制作地图，尤其是从 19 世纪末开始用于军事领域。这种方法的原理是按照从天空中可见的参照点拍摄照片，再将照片拼起来，并根据每个参照点的坐标得知比例。其操作难点在于，必须知道拍摄照片时相机在空中的具体位置，然后才能确定如何摆放相机，让相机朝向何方。最后，手工拼凑照片的工作非常精细，简直是一门艺术。

从 2000 年左右开始，数字照相机和运算能力强大的电脑能自动完成这一工作。从那以后，在不知道相机具体位置的情况下也可以用二维影像把所有照片拼起来，建立三维模型。一款照片图像软件可以从照片中提取数千点，这些点是对比强烈的细节（石头、灌木丛、房角……），它们的作用是连接各个照片，确定如何将其拼凑重叠。由于这些点在不同距离和不同角度都可以看见，软件能够借此计算出拍摄照片时照相机的位置。而且，这种方法还可以确定照相机的朝向，通过数学模型改正光学失真问题（照片角落变形），通过参照自动驾驶仪持续记录的相机高度，估算出当时的高度 。这是对截线定理（即泰勒斯定理）的具体应用。使用这种测量方法需要正确的拍摄方法——覆盖率应达到 60% 以上，镜头的相对孔径和飞行速度恒定。

和人们的固有想法不同，为了获得三维图形不需要机载两台照相机，一台市场上购买的

普通照相机足矣。最好选用广角光学镜头，以便在特定的高度尽可能大地覆盖地面。同时，应尽量降低在飞机移动过程中拍摄，避免造成照片模糊的因素。光学镜头照相机可以更换，像素在 1000 万以上的镜头可以拍摄到品质非凡的照片。这些相机重量轻，可以装在无人机上。

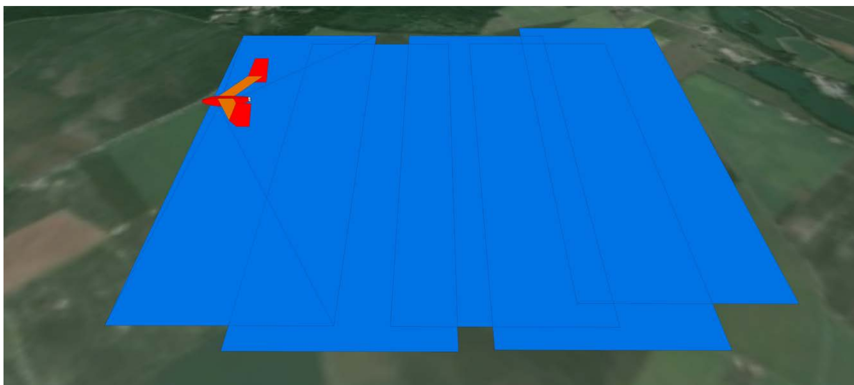


图 5-12　无人机垂直拍摄照片的示意图，其拍摄照片范围用彼此重叠的蓝色方形面积表示

为了提高建立三维模型的精确度，拍摄照片时可以加入地面目标，通过传统地形测量技术精确测出地面上目标的坐标。这样还能在国家坐标或者世界坐标系统中提高地理参照精确度。所谓精确度，指的是某地的实际位置和测量数据之间的误差。没有目标且仅使用机载全球卫星定位系统的情况下，在 X 和 Y 轴上误差为 1 米，在 Z 轴上误差为 5 米。在摄影测量中，垂直方向的误差至少是水平方向误差的两倍以上。加入目标时，如果能在地面上固定边长 50 厘米的正方形十字叉指示标记（参见图 5-13），测量误差仅为几厘米。



图 5-13　用全球卫星定位系统测量的可移动标记，坐标数值精确到厘米

比如，“天宝 X100”无人机飞到 150 米高度时，在 X 轴和 Y 轴上的误差是 8 厘米，在 Z 轴上的误差是 20 厘米。标记必须分布在无人机要拍摄的区域内，三个标记即可。但最好能在要拍摄区域的每个角落和中央都放置标记。这样平面误差可以小于 4 厘米，高度误差可以小于 10 厘米。



图 5-14 “天宝 X100”拍摄的典型照片，覆盖率 75%，照片中显示的是种植区

摄影测量法的成果有：

- 经过正射纠正的二维大照片，被称作“正射影像”；
- 地表情况的三维反映，被称作“数字表面模型”（简称 DSM）。

“正射校正”包含“平面和分辨率恒定”的意义。比如，用摄影测量法拍摄的建筑物垂直面呈直立状态，所以在正射影像的照片上看不到。每厘米上的分辨率决定每个像素的大小，分辨率直接由飞行高度决定（在同一区域，飞得越低正射影像上的像素越多，像素就越小）。“天宝 X100”无人机拍摄的照片就是佐证（参见图 5-15 和图 5-16）。

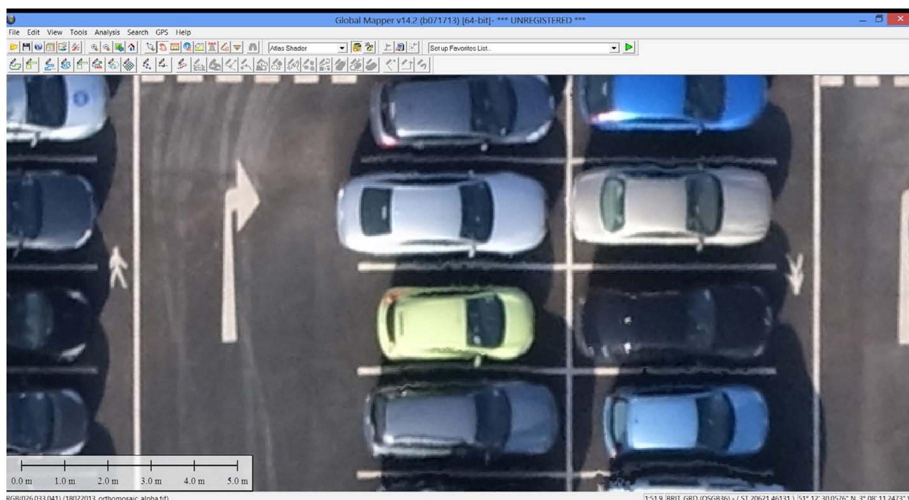


图 5-15 分辨率例证：在 100 米高空，每个像素相当于实际 3.7 厘米

比例还取决于焦距：焦距越长，比例越大。一边来说，民用无人机使用的照相机焦距

固定，能改变的只是飞行高度。

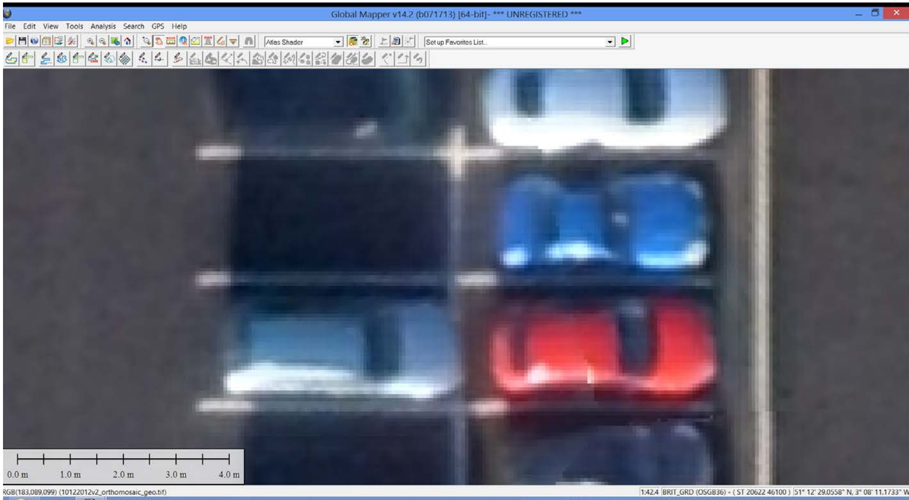


图 5-16　分辨率例证：在 190 米高空，每个像素相当于实际 6.7 厘米

因此，在飞行时间相同的情况下，飞行高度直接影响照片的覆盖面积。但是，正如在例证中看到的，飞行高度越高，覆盖面积越大，但照片细节质量也越差……

表 5-1　“天宝 X100”无人机在不同飞行高度摄影测量的结果

高度	飞行覆盖面积	像素代表的实际距离
100 米	0.8 平方公里	3.7 厘米
150 米	1.2 平方公里	5.3 厘米
190 米	1.6 平方公里	6.7 厘米



图 5-17　正射影像：上方，布满岩石的海岸

正射影像照片可以用传统的图像软件观看（iPhoto、Photoshop、Lightroom 等），不过用地理信息系统软件（GIS）观看效果更佳，比如谷歌地球、Global Mapper 和 ArcGIS。这些软件可以识别地理标记。正射影像上的一点可以表示经度和纬度：只需用鼠标确定至少 2 点就可以算出两点间长度，至少 3 点可以算出面积，至少 4 点算出体积，比拿出尺子测量方便多了！

三维数字表面模型用不符合实际的颜色表示海拔高度。最好用地理信息系统软件观看这样的图片，因为这种软件有三维看图的选项，而且能让观看者有身临其境之感，如同身处土地上方一样，还可向各个方向旋转图片。另外，不要混淆数字表面模型和数字地面模型（DTM），数字表面模型更加“粗糙”，包括树尖、房顶、汽车……而数字地面模型完全没有不必要的人工障碍物或天然障碍物。数字表面模型需要进一步编辑，清除所有“多余”元素。

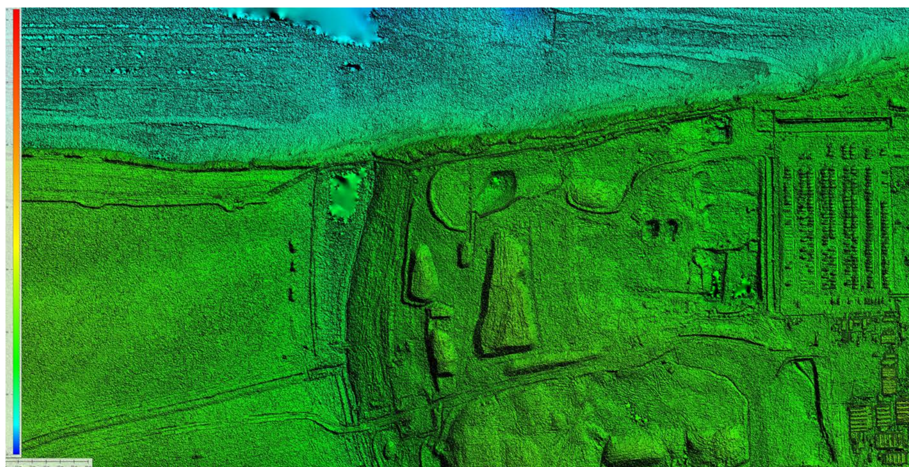


图 5-18　数字表面模型，可以和前边的正射影像重合，其颜色代表的高度从 0 米（以海平面为准）到 40 米

数字表面模型有两大功能——画出等高线和计算体积。

画出等高线

在数字表面模型上画出等高线的工作非常简单。只要在屏幕上确定高度，然后选定等高线之间的间隔、简化程度等选项之后就可以开始了。和前文提到的一样，数字表面模型把地表上的物体都涵盖在内。所以，一定程度的简化还是有必要的，这样可以防止最终的等高线过度起伏，在平坦表面上也一样。

正射影像、数字表面模型和等高线之间可以互相组合。正射影像可以覆盖数字表面模型，使定位更加容易。

图 5-19　间距 1 米的等高线，印在正射影像照片上。拍摄一片潮湿地域，用传统地形测量方法很难实现



图 5-20　以三维视角呈现覆盖数字表面模型的正射影像实例一



图 5-21　以三维视角呈现覆盖数字表面模型的正射影像实例二

以数字表面模型计算体积

比如，我们想要知道覆盖有数字表面模型的正射影像正中间的一座土山的体积（参见图 5-22）。



图 5-22　需要计算体积的土山的正射影像

计算体积分两步进行。

1. 选定区域，画出边界。

2. 选择比例尺，确定从哪一海拔高度开始计算体积：这里指画出边界各点的海拔。

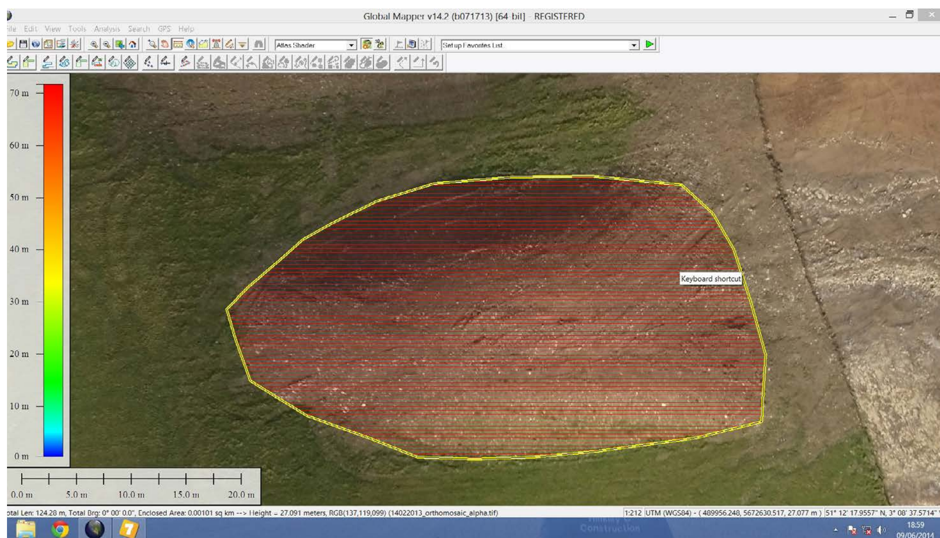


图 5-23　第一步：画出选定的土山边界

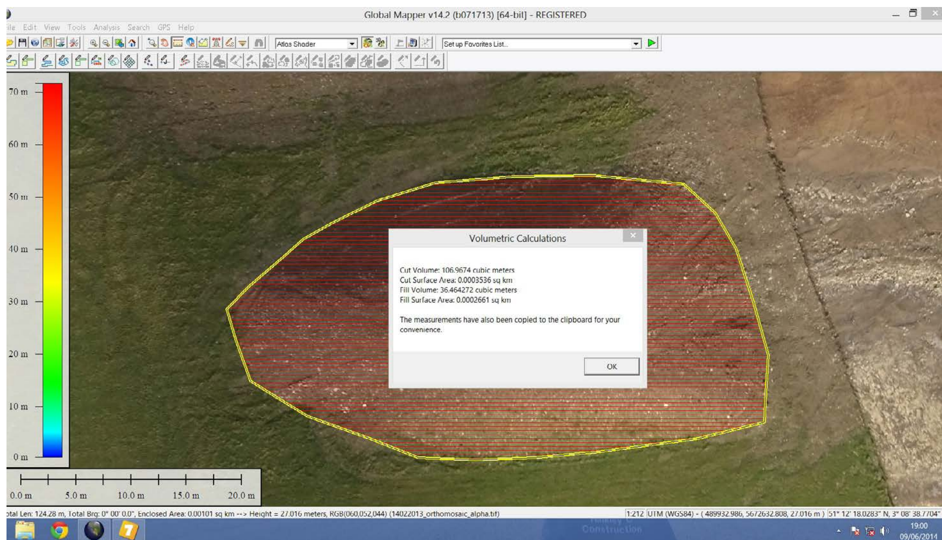


图 5-24　第二步：设定计算参数

通过地理信息系统计算选定区域的体积，选定区域的海拔高于划清边界各点的海拔。

此处土山的体积为 106 立方米，表面积为 353 平方米。

此外还可计算出负值，如洞穴、沟壑的容积。例如，计算一张正射影像中心凹陷的容积（参见图 5-25）。

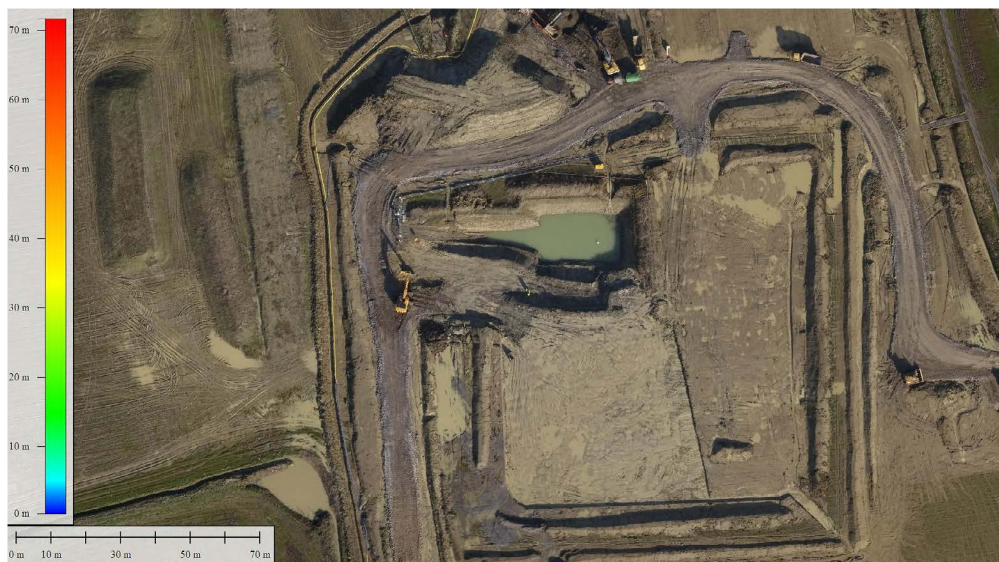


图 5-25　需要计算凹陷容积的正射影像

通过点击轮廓画出边线：选择的区域面积为 263 平方米。



图 5-26　第一步：画出选定的凹陷边界

在此例中，凹陷容积是 286 立方米，没有计算水下的部分。

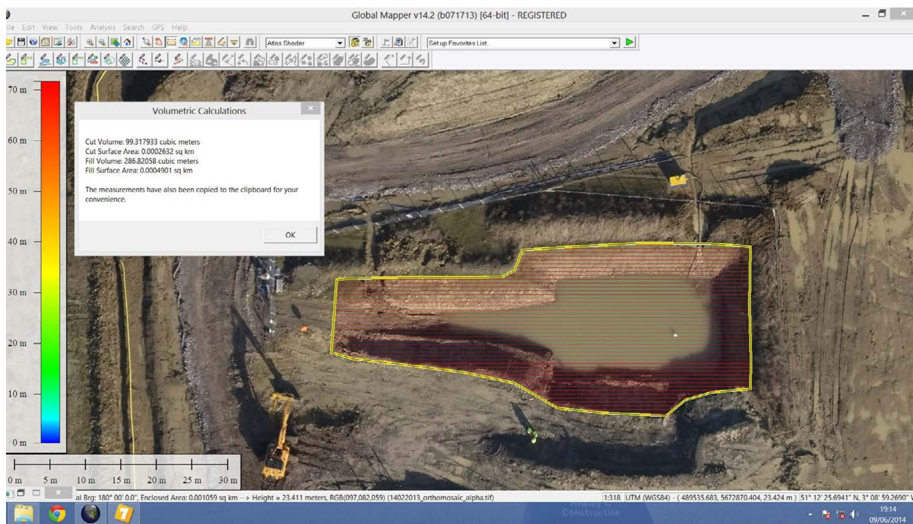


图 5-27　第二步：设定计算参数

当然，计算的准确度依赖于对目标区域的正确选择。正射影像中地面上的参照物会是很有价值的帮助。

景色的变化

无人机可以重复飞行路线，间隔一定时间按原路线重新飞行，展示出景色的变化，这就是四维展示：三维景色之外加上第四维度——时间。



图 5-28　每周一次拍摄照片，展示为筹备工地所开垦土地产生的变化

无人机拍摄照片的缺点

用无人机航拍会不会让地面拍摄成为历史呢？未必，因为无人机拍摄照片并非无往不利。

首先，在高速运动中用快门拍摄照片只能在阳光下进行。

另外，拍摄反光表面（水、玻璃）和花纹重复的表面（瓦片屋顶、建筑图案）时，照片上的像素无法应用，软件也无法把这种表面的照片拼凑组合。同样，被阴影遮蔽的表面也会看不清楚细节。

而且，在无人机拍摄若干照片的几秒钟时间里，目标必须保持静止，因此无法对移动的车辆或动物建模。在正射影像中，移动的物体会被屡次拍摄到，却不能在数字表面模型上呈现。

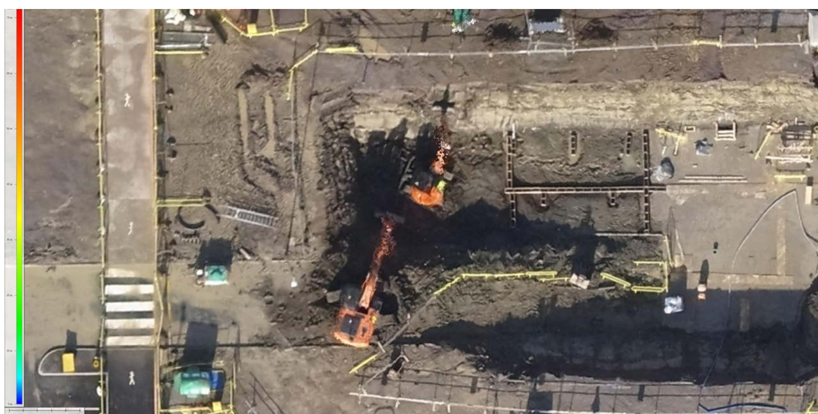


图 5-29　这张照片上似乎有两台挖掘机，但实际上只有一台，无人机多次经过拍照时，这台挖掘机也移动了若干次位置

还有一点不足，自动摄影测量让建筑物脊部模糊。解决这一问题的最简单的方法是把原照片粘贴在上边。



图 5-30　照片中房屋的屋脊显得模糊

总之，如果照片不经过编辑，数字表面模型对垂直度（墙、柱子）的反应非常糟糕。

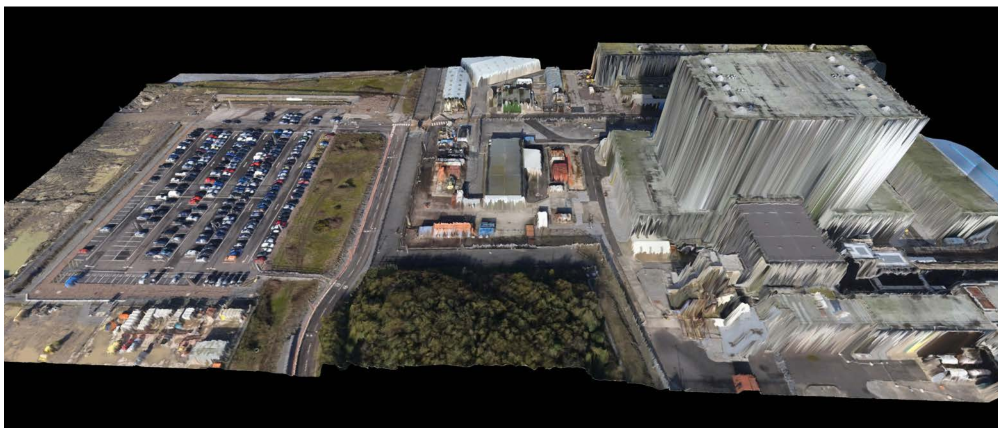


图 5-31　照片中工业建筑的垂直度需要校正

高覆盖率（80%）能够缓解问题，但会降低每次飞行摄影时覆盖的地面面积，从而大大延长时间。为使照片中的物体具有真实的几何外形，需要使用向量化软件。

一簇簇的枝叶外形复杂，很难通过数字表面模型展现，而且，拍摄时枝叶随着风摆动，会使照片模糊。在覆盖率不太高的情况下，照片中的树木如同岩石一般。

电脑处理照片需要花费时间，一台内存 32 吉兆的电脑（一台优秀的游戏电脑配置）逐个处理 1000 张每张像素 1000 万的照片，需要不到一个晚上的时间。但是，如果照片数量增加或者每张照片的像素增加，处理时间将大大延长。

数字表面模型包括数百万点，往往需要简化后才能处理。遇到多云天气，拍摄照片时会因曝光差异导致问题。相机上的小型传感器对此非常敏感，具体表现是正射影像上会出现平行的深色条状阴影。我们可以从源头弥补这种缺陷，把阴影颜色过深的照片抛弃，或者，在后期处理时改变某些区域的曝光度。

今天，利用无人机进行的摄影测量要面对激光雷达的竞争挑战。在不拍摄物体的情况下，激光雷达拍摄法可利用雷达进行 360 度反射，从而获得物体外形。但激光雷达重量较大（超过 1 公斤），目前仅适用于大型无人机。可是，这一局限很可能会被打破。

工程检测

目前，在如法国这样历史悠久的国家里，比起新建工程，更需要维护现有建筑：桥梁、水坝、风力发电厂、光电池电厂、电线、管道……而相关企业机构，如法国国家铁路公

司、GRT 天然气公司、威立雅集团、配电网公司、智能电力网公司、国家公路委员会等，需要清楚了解公司设施状况，才能保证有效维护。

仔细检查水坝的混凝土表面和桥梁，详细记录并监视发现的裂纹。沿着管道、输油管线前行监测，寻找是否有泄露、管线腐蚀的现象。定期测试天阳能光电池板，出现问题及时更换。在地面上用望远镜观察或者用长焦镜头拍摄风力发电机桨叶的情况，尽力发现微小的缺陷。电线工定期检查电线，找出发热点。完成这些工作需要可升降平台、绳索、脚手架，通过步行或者乘坐车辆完成长途移动，前往各种建筑所在地，甚至进入深山。

在上述领域中，无人机的作用意义非凡。无人机不但可以用传感器代替人类的眼睛和耳朵，还让人类避免再冒着生命危险工作。比如，2011 年，法国米约市进行每十年一次的高架桥检测交由无人机完成，一时成为公众的热议话题。此后，无人机登台亮相的新闻层出不穷。易捷航空公司（EasyJet）最近甚至表示，准备用无人机检测自己公司运营的飞机。

这些检测工作大多采用多旋翼无人机，因为需要靠近建筑物，无人机体积应该与被检查工程相匹配，避免导致被检查对象发生危险。热衷使用无人机的企业更关心无人机生成数据的质量和价值，而不是无人机的飞行能力。但是，企业仍把预防危险当作第一要务，不想无人机对建筑或地面上的人员造成威胁。

使用无人机的优点如下：

- 降低人员工作风险，避免高空作业，免于溺水威胁，防止在平地上的事故；
- 自动处理已经获得的数据；
- 处理数据的效率更高；
- 降低维护成本，只在出现问题的地方实施维护；
- 维护效果更好，目标工程的功能更佳；
- 缩短检测时间，让被检工程或建筑更迅速地重新投入工作；
- 降低检测成本。

从长远看来，如果在建筑设计之初就考虑周到，放弃仅能用于检测的累赘构造（梯子、阶梯……），让检测通路与新建筑融为一体，无人机将发挥更加巨大的优势。

而且，无人机属于年轻人喜欢的革新性事物，为维护和工程领域的工作塑造了一个全新形象，令相关行业后继有人。在大型企业中，各种获得桂冠的创新方案往往都涉及无人机的应用。

运输

2013 年，亚马逊公司发布了一段让人心驰神往的视频：无人机把包裹快递到购物者住房门前。DHL 公司紧随其后，发布了在德国用无人机运送包裹的视频。几个比萨饼连锁店也不甘示弱，发布了几段虚构的无人机送货视频，海滩经营者也发布了用无人机送鸡尾酒的视频。

无人机可以飞越交通堵塞，创下了历史最短的送货时间记录。送货，很可能是无人机未来的重要应用领域。用无人机运货，是纯粹为了博人眼球的宣传手段，还是未来的发展方向呢？理论上讲，一架 8 公斤重的无人机可以在二十几公里的距离携带一二公斤的负载。但是，在城市中使用的这种技术尚不成熟：首先，需要激光雷达障碍探测器，而且雷达必须体积够小，能安装在无人机上；其次，惯性测量单元必须在没有全球卫星定位系统的情况下也能保证飞行。可是，以上技术目前仅存在于实验室中。而且，无人机的这种飞行方式恰恰触犯了现行法律严令禁止的情况：在人口密集地区，脱离操控者视线范围自动飞行！用无人机运货还可能造成货物失窃。另外，人们还可以利用无人机在监狱上空投放武器、毒品，甚至利用无人机实施恐怖活动！

无人机运输的最大前景应该在紧急救援方面：投放补给、药品，在海面上投送救生圈。目前，已经有人在工业领域开始进行试验，把无人机作为组装流水线的一部分，把流水线变成“飞行流水线”。无人机携带实用载荷质量小的缺点可以通过高速度和灵活性弥补，而且，可以同时大批使用无人机，出动无人机群。一些实验室让无人机组队工作，用泡沫块作为原料搭建了几米高的塔楼。

无人机起初被军方用作武器，而后被技术宅男当作程序编制工具，又被摄影师当成拍摄仪器。从此以后，无人机将敲开各行各业的大门：这是一场真正的革命！

无人机的缺点与局限

缺点与局限并非无人机的专利，所有技术革新都存在不足之处。如果无人机领域竞争激烈，就会有企业或机构采取行动，让无人机迅速改进适应。否则，技术停滞的时间就会很长！

- 尽管无人机配备优秀的传感器，但不能进行自我维护。相反，某些情况下，传统飞机表现得更加多才多艺。直升机可以在靠近电线的地方同时检查、修剪植物。
- 大多数现行法律对无人机在城市上空飞行，以及在操控者视野外飞行的规定极其严格。通过限定持续飞行无人机的重量，法律规定无人机装载的传感器往往无法满足常规技术要求。

- 无人机采集很多数据，但没有辨别能力，比如，会对每个检测的天线塔都拍摄数百张照片，因此，甄别数据的工作很耗费时间。理想的情况是，无人机在飞行拍摄的时候就能进行区分辨别。或者在操作无人机拍照的同时，有人在平板电脑上同步对照片进行选择。
- 无人机的应用客户习惯于每次向供应商寻求同一水平的技术与服务。客户享受的通常是“交钥匙”式服务，包括从申请许可、获取处理数据、检测并指出建筑物的缺点直至无人机维护等一整套服务……但是，目前无人机运营厂商都是新兴小型科技企业，没有能力提供客户所需的所有服务，在提供的数据出现错误时，也无法承担责任。
- 在法国，如果想使用无人机执行特殊任务，必须要向法国民用航空总局申请测试和许可。由于技术发展迅速，总是需要重新进行测试，造成一些人的观望态度。应用无人机执行任务的客户会比较单位价格，比如，摄影测量法每公顷的花费、直线拍摄每公里的花费，等等。
- 无人机大型机群活动需要包括各种程序在内的管理系统。改变程序则需要各种确认，耗费时间与精力。
- 无人机的应用大客户花了数十年时间，集中力量发展各自核心业务，以降低成本、减少危险。结果，无人机检测工作往往由外包企业承担。因为，改变工作模式意味着需要重新获取一些技能。
- 根据规定，大型工程（水坝、飞机场控制塔等）必须进行检查，但具体操作规程的有关改变必须经过上游管理机构的许可。

第六章

无人机相关法律法规[①]

“相信我的人，支持我。不相信我的人，让我干劲十足。”

—— 飞行员尼古拉·阿德（Nicolas Ader）

2014 年 1 月，一名年轻的法国企业家在 YouTube 网站上发布了展示自己的城市——法国南锡的视频。这段视频是用大疆“精灵”小型无人机搭载 GoPro 摄像机拍摄的。这架无人机沿着历史建筑的墙面飞行，穿过门庭拱廊，绕过支柱与路灯的间隙，在行人头上略过。视频在网站上大获成功，点击量超过 400 000 次。但这也引起了警方的注意，警方找到并传唤了视频的制作者。由于视频制作者的行为危害到他人的生命安全，警方对其处以 400 欧元的罚款。幸好没有人在这起事件中受伤，通过该则社会新闻，法国大众了解到法国民用航空总局针对无人机应用制定的相关规章条例。

航空法规的目的是保证空中安全，预防坠落事件发生。法国是世界上率先通过无人机应用法律的国家之一，在 2012 年 4 月 11 日通过了两条相关法令及其解释，详见：http://www.developpement-durable.gouv.fr/Demarches-pour-effectuer-des.html。

法律允许在专业领域使用无人机，这属于“特殊航空活动”，必须满足一定的使用条件、设备要求、操控人员能力要求和空间限制。“航空准则”不但适用于飞行员，也适用于无人机操控人员。其责任包括防止碰撞，必须在“能见度高、可以预防碰撞”的天气条件下凭借视觉手动操作无人机，保证飞行高度。

除了安全问题，无人机的使用也会让人遇到棘手的隐私保护问题。

行政手续

无人机应用有两种目的：娱乐用途或者专业用途。飞机模型爱好者已经进行多年的模型飞机、模型直升机飞行活动。根据规定，活动地点应在城市之外，150 米高度以下，模型飞机与操控人员相距 500 米以内，活动范围在远离机场的飞机模型场地内，所有飞机

① 本章主要涉及法国及欧盟针对无人机应用制定的相关法律法规，仅供中国读者参考。请中国读者参阅并严格遵守中国民用航空局颁布的《民用无人机空中交通管理办法》《民用无人驾驶航空器系统驾驶员管理暂行规定》等相关法规。——编者按

模型场地都被记录在案。视频实境驾驶时，应该另有人在旁边观察。在法国无人机立法领域，法规曾经在一段时间里模糊不清，在那段时间里，一个操纵“鹦鹉 AR”无人机的少年可能会触犯法律。2014 年 4 月 10 日，法国民用航空总局在网站上明确指出，模型飞行器（这里指娱乐用无人机）可以装备照相机，前提条件是，所装备照相机只能用于私人用途，不可侵犯他人隐私权。以私人用途为目的使用无人机进行的活动不可以换取酬金——如果把拍摄的照片卖给他人或在工作范畴内使用无人机，就属于“特殊航空活动”，其使用条件必须符合所有法律规章。

和超轻型飞行器（ULM）一样，无人机产业在无需飞行执照的简化行政制度下迅速发展。目前来说，在法国获得无人机飞行许可的所有手续都属于宣告程序，而且全部免费。图 6-1 列出了申请许可时需提供的所有文件。

对法国民用航空总局来说，运营企业或个人需要为无人机的任务承担责任，也就是说，无人机群的负责人、无人机操控人员的雇主要为无人机负责。运营者需要根据一份四十多页的大纲制定一份特殊活动手册（MAP），描述任务的组织情况、无人机驾驶员培训程序、筹备进程、飞行指挥、无人机保养。特殊活动手册中不但需要标明无人机群的组成、运营企业的无人机驾驶员名单，还应标注清楚何种无人机应用于何种类型的任务，同时，公布无人机驾驶员的资质能力。

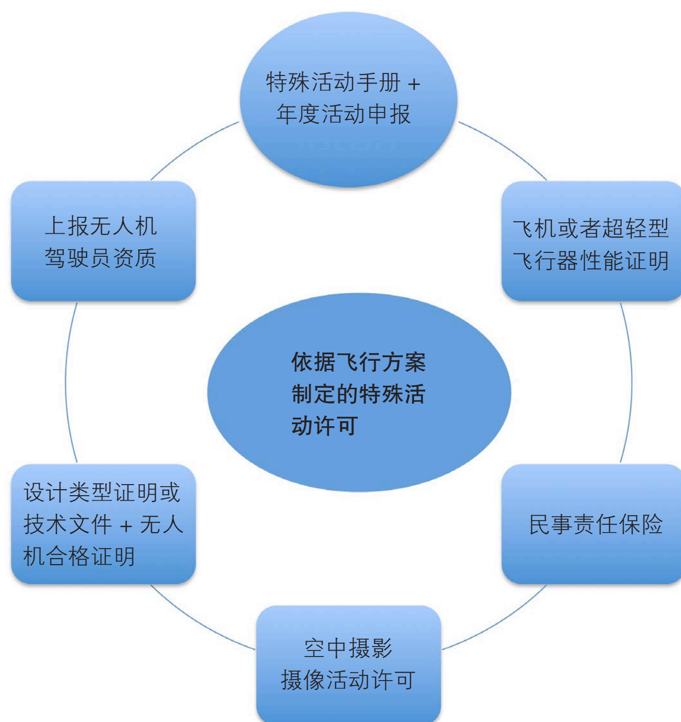


图 6-1

无人机可以是成品无人机也可以是运营商组装的无人机。如果购买的无人机是成品，由无人机设计厂商或者销售商提供种类设计证明书即可。买家在购买前需要履行所有必需手续。如果无人机需要组装，供应商会提供二十多页的技术文件，包括说明示意图、组件、安全装置、运行方式的描述。

操控人员必须拥有一定的资质，至少需要拥有初级飞机、滑翔机、超轻型飞行器的理论资格证书。驾驶员的飞行经验能够为自己的飞机理论资格证书增添说服力，没有经验的新入行者应该选择考取其中最简单的证书——超轻型飞行器理论资格证书。这种考试的形式是回答 40 道多项选择题，正确率超过 75% 即可通过。考查内容涉及空中飞行相关法规、对无人机的一般了解、人员操作的优势和劣势、天气预报、操作导航和操作程序。如果希望参加全日制培训，一周的全天授课足以学习所有的理论知识。如果参加半日制授课，由于飞机俱乐部的活动每周一次，学习所有课程需要大约一个季度。自学《超轻型飞行器飞行员手册》(Colliectif. Manuel Pilote ULM. Paris : Cépaduès, 2014)并在因特网上备考，考前至少需要一两个月的突击复习，才能取得成功。法国民用航空总局不设置实际飞行考试，雇主公开宣布肯定操控人员的能力即可。

无人机运营企业可以自行编制培训手册，宣布自己的无人机操控人员经过培训后具有合格资质。运营企业根据特殊活动手册中的指导规划和检验规定，需要经过至少一次演示飞行后，才可以向驾驶员发放资质证书。

编撰材料可能需要几个月时间，有些无人机制造商或者销售商会提供事先已经填写好的特殊活动手册，详尽描述无人机的特性。此后，需要等待两个月时间才能得到特殊活动手册的提交证明，这份证明是进行无人机商业应用活动的敲门砖。获得许可的无人机运营企业名单在法国民用航空总局网站上公布，每个月更新一次(现在有将近 1000 家企业)。获得特别许可的企业名单不在此列。

此外，必须向法国民用航空总局提交摄影、摄像活动申报以及身份证件。不论搭载摄像头的方式如何，只要涉及空中摄影、摄像的专业人士都必须遵守这一规定，目的是预防恐怖活动。另外，作为无人机领域的专业人士必须投保民事责任保险，每架飞机每年用于这项保险的费用为数百欧元。

特殊活动许可根据飞行方案发放。

飞行方案

无人机飞行的基本原则是：不得威胁其他航空飞行器的安全，不能对地面上的人员和财产构成危险。无人机与飞机相撞会造成严重后果，而且飞行员在驾驶舱中很难发现无人机的存在。为了解决这一问题，飞机与无人机在各自不同的“隔离空域”活动。

为了避免无人机与飞机相遇，法律规定二者要在不同的高度飞行：无人机在低于 150 米（约 500 英尺）高度飞行，飞机要在 150 米以上的高度飞行。此处的高度指的是和地面的相对高度，不是指相对于海平面的海拔高度。但是，即使无人机在较低高度飞行还是有可能遇到直升机、跳伞者、滑翔机、正在起飞或降落的飞机、军方飞行器。法律规定了无人机操控人员和无人机之间的最大距离，以便保证操控人员可以遵循“看见并让无人机避开”障碍物的原则。凭借无人机上的全球卫星定位系统、带有海拔高度和距离限制的气压高度计、下行遥测联络通信，无人机操控人员可以遵守以上各项规定。

为了避免事故发生，根据规定，无人机不能从人和动物的头顶上飞过，必须在水平方向保持 30 米的最短距离。在广义的“居住区”范围内，也就是城镇，对无人机的限制条件最严格，比如航空图中的黄色和橙色部分，以及人群聚集的地方，如海滩、音乐会……

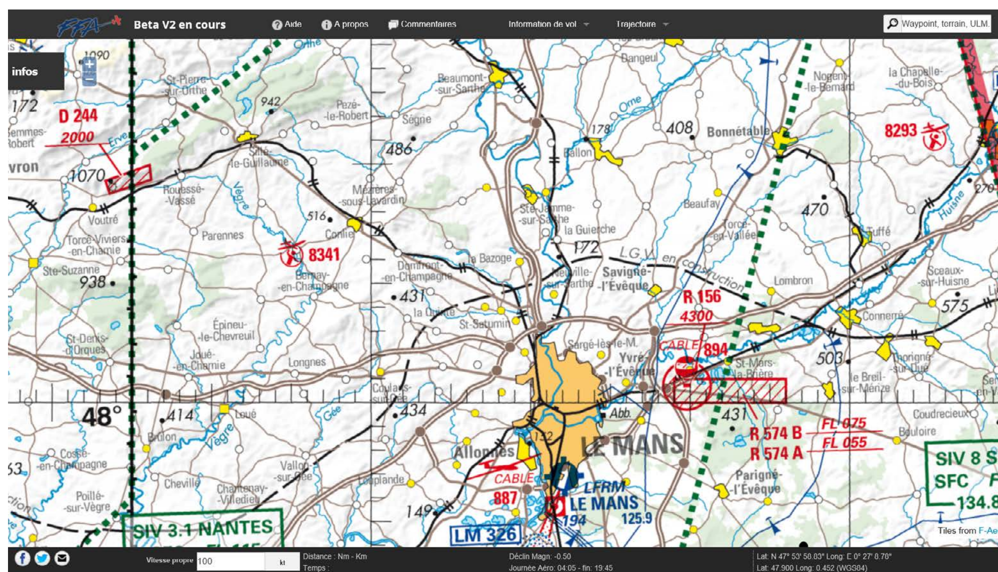


图 6-2　在 http://carte.f-aero.fr/carte-aero-v2/ 网站上可以免费使用的航空图

无人机越重越危险，按不同重量的无人机分类如下：低于 2 公斤（D 级）、2 到 25 公斤（E 级）、25 到 150 公斤（F 级）。C 级是重量小于 25 公斤的外挂摄像头无人机（主要是气球）。重量最大的无人机（G 级）归欧洲航空安全局管辖。

下述 S_1、S_2、S_3、S_4 为题的飞行方案具体规定了最大重量、最高高度、与居住区和非居住区最大距离，并且在表 6-1 中做出了总结。对装备安全和无人机操控人员的资质要求在最复杂的的飞行方案中有明确规定。执行 S_1 和 S_2 飞行方案时需要与法国跨地区民用航空安全局（DSAC）沟通，申请许可。S_3 和 S_4 飞行这些复杂方案的许可申请要集中到法国民用航空总局申请。

表 6-1　四种飞行方案总结

飞行方案	S_1	S_2	S_3	S_4
级别	C、D、E	D、E	C、D、E（携带降落伞小于 4 公斤）	D
最大高度	150 米	50 米	150 米	150 米
操控人员距离	视野范围内	视野范围外	视野范围内	视野范围外
	100 米	小于 1000 米	100 米	
允许飞行区域	居住区之外	飞行区不得有人	城镇或者人、动物附近	居住区之外

飞行方案 S_1

飞行方案 S_1 的特点

级别：C、D、E
最远距离：100 米
最大高度：150 米
最大重量：25 公斤
允许飞行区域：远离人群密集处

这是最简单的方案，因为无人机在城镇之外飞行，而且距离操控人员很近。可以使用质量最大的无人机（25 公斤），单独一个旋翼就可以胜任在如此狭小空间里的任务。这种飞行方案对于无人机操作“初学者”来说相对简单，因为不需要在无人机上准备特殊的安全装置。

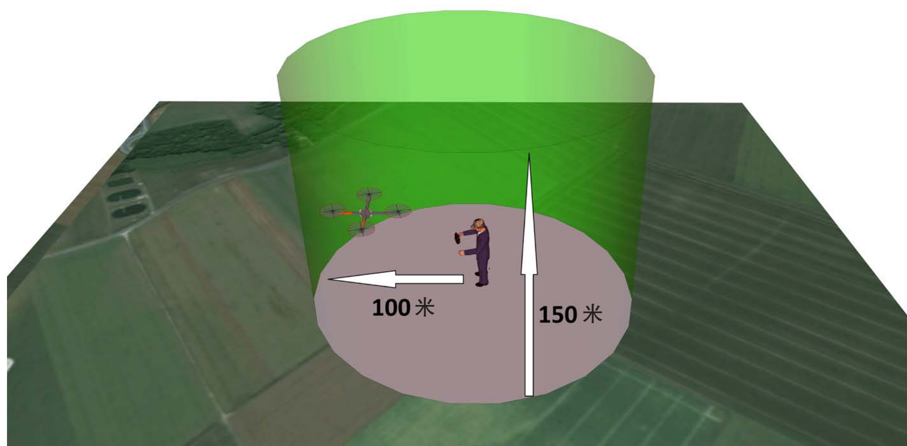


图 6-3　田野上，无人机操控人员在 S_1 方案的限制空间中

飞行方案 S_2

飞行方案 S_2 的特点

级别：D 或 E
最远距离：小于 1 公里
最大高度：50 米
最大重量：25 公斤
允许飞行区域：远离人群密集处

该方案飞行区域广阔（半径可达 1 公里），让固定机翼无人机和一些性能优越的旋翼无人机使用者很感兴趣，在这样的条件下，可以进行地形测量数据采集。

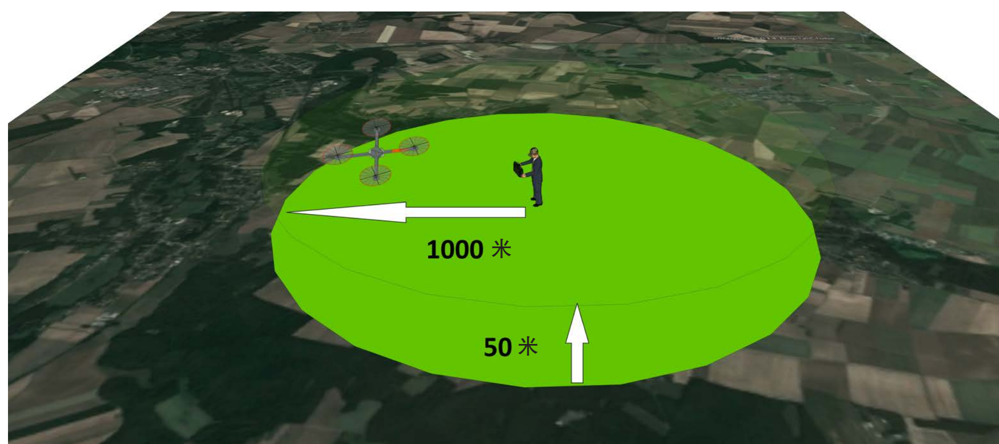


图 6-4　田野上，无人机操控人员在 S_2 方案的限制空间中

在几百米之外，肉眼就无法观察到无人机了。为了能够随时了解无人机的详细位置，保证能够躲避飞机——在这个距离仍然能够清楚地看到飞机，操控人员必须配备装有地图绘制导航软件的控制台。另外，应该输入飞行参数，通常情况下，自动驾驶仪会遵守规定。在超过允许范围的时候，无人机会自动降落。

在试飞之后，法国民用航空总局会允许无人机在更高的高度上飞行，前提条件是飞行区域与居住区之间留有隔离区域。比如，“天宝 X100”无人机可以使用 S_2 方案在 150 米高处飞行，但要保证离居住区至少 250 米之外。

操控人员有义务在每次无人机飞行前 24 小时向法国民用航空总局报告自己的飞行计划，接收报告的电子邮件地址如下：dsac-operation-rpa-bf@aviation-civile.gouv.fr.

飞行方案 S_3

飞行方案 S_3 的特点

级别：C、D 或 E
最远距离：100 米
最大高度：150 米
最大重量：2 公斤（携带降落伞 4 公斤）
允许飞行区域：城镇

S_3 方案是最让人感兴趣的飞行方案，因为该方案可在居住区域执行。无人机在有人居住的地区上空工作，发展潜力最大。S_3 方案允许飞行的距离与高度与 S_1 方案相同。为了降低坠机造成的损失，本方案要求无人机必须装备特殊安全措施。

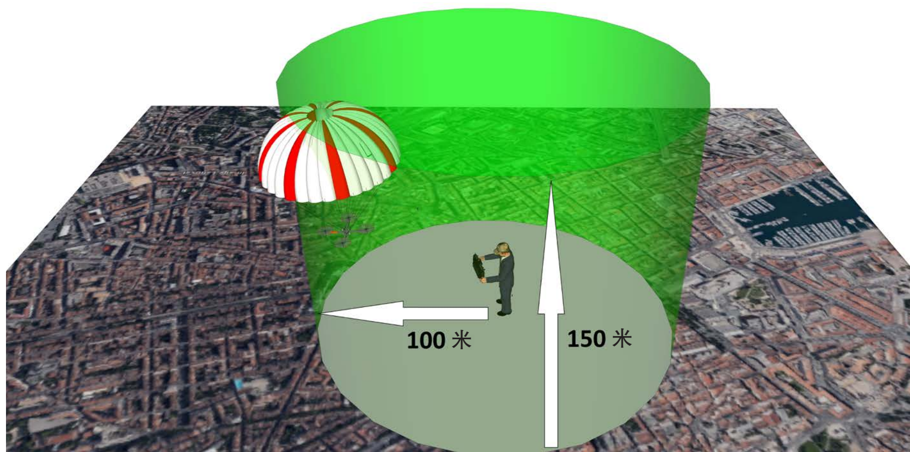


图 6-5　在城镇执行的飞行方案 S_3：在飞离规定区域、和控制台失去无线电联系的时候，无人机的降落伞会自动打开

如果无人机坠落，为了减轻机身与地面撞击力，S_3 方案规定携带降落伞的无人机不能超过 4 公斤，没有配备降落伞无人机不能超过 2 公斤。在无人机飞离规定区域时，降落伞需要能够自动打开，同时，降落伞也可以由操控人员手动打开，把撞击时的能量限制在 65 焦耳。要为每公斤质量准备 1 平方米的面积。无人机应该能够在与控制台失去联系后自动降落。

为了得到 S_3 方案的许可，需要发给法国民用航空总局一段视频，展示降落伞功能完好。必须满足一系列严格的要求：特写展示无人机，然后展示无人机称重小于 4 公斤。而且，在整个飞行过程中，要在前景中拍摄无人机操控人员和无人机。必须公布飞行高度、降落伞打开、降落，直至着陆，要拍摄整个过程。为了谨慎起见，建议用重物代替实用载荷，并加强临时防护措施。

鉴于无人机最大重量不超过 4 公斤的严格限制，很多在城镇使用大型摄像头的拍摄人员转而使用气球，因为法规允许气球的最大重量是 25 公斤，不过允许的高度仅为 50 米。但是，使用气球需要充气、放气，而且冲入的氦气增加成本，可能会使一些人望而却步。

每次在城镇的任务都需要得到省政府的许可，手续需要一个月的时间。下发许可以后，省政府会通知警察，决定是否需要关闭道路交通，是否需要禁止行人通行，还要确定任务日期、任务开始和结束的时间。

飞行方案 S_4

飞行方案 S_4 的特点

级别：D
最远距离：视野之外
最大高度：150 米
最大重量：2 公斤
允许飞行区域：居住区之外

这是四个方案中唯一没有规定最远距离的方案，只要在控制台和无人机没有失去联络，就可以采用该方案进行试验飞行。最大高度为 150 米，考虑到空中交通的危险，该方案属于试验方案，对其执行有着严格的要求。S_4 方案主要适用于线状路线检查，比如电网、天然气管道、铁路、河流。



图 6-6　执行飞行方案 S_4，用飞翼无人机在城镇以外沿铁路线飞行，线路从起点到终点总长 15 公里，无人机操控人员在铁路线中间处

无人机重量不能超过 2 公斤，从空气动力学角度看，这个重量也是一只鸟的理论重量。和飞行方案 S_2 一样，本方案要求装备地图绘制导航软件，并在居住区外飞行。另外，

还要求无人机装备面向前方的视频拍摄装置，一旦遇到问题，接收到的视频可以帮助操控人员远离居住区。目前只有法国德莱尔技术公司的固定机翼无人机 DT18 获得了 S_4 飞行方案的许可。

对于无人机操控人员来说，各种要求同样十分严格，操控人员必须拥有飞机私人的飞行驾照，或直升机私人飞行驾照，或滑翔机飞行驾照，同时还要还要有 100 小时担任飞机机长的经验和 20 小时的无人机操作经验。在法国民用航空总局分析了运营商与直接指挥无人机执行任务的企业自行说明的任务中的危险因素，发放许可之后，无人机才可以执行任务。

由于飞行高度有限，在操控人员与无人机直线距离为大约 15 公里时，二者就会失去联系，如果中间存在障碍物，这个距离还会缩短。把控制台放置在巡行线路中间，无人机飞行的理论距离就成了 30 公里。只有在设立中继站（不方便）或采用卫星通信（过于昂贵而且装备体积大、沉重）的情况下，飞行距离才能够超过这个极限。

对飞行空间的限制

无人机禁止在一些空间飞行，尤其是和飞机场直接接触的地区。除非有特别许可，否则，无人机都要和自己的前辈飞机一样，远离一些危险区域（比如军队靶场）、法规指定区域（在使用时严禁进入的区域）、临时隔离区。遵照法律，无人机在法国境内 1850 个飞机场和直升机停机坪附近飞行时不能超过一定的飞行高度。相关飞机场在 1/500 000 实际比例的航空图上标出，图上没有标注的草地私人飞机场不在范围之内。无人机允许的飞行高度和无人机距离机场跑道的距离相关。

法令根据不同类型的飞机场规定了四种情况。

情况 1：飞机场跑道长度小于 1200 米，或没有协助降落的辅助设施

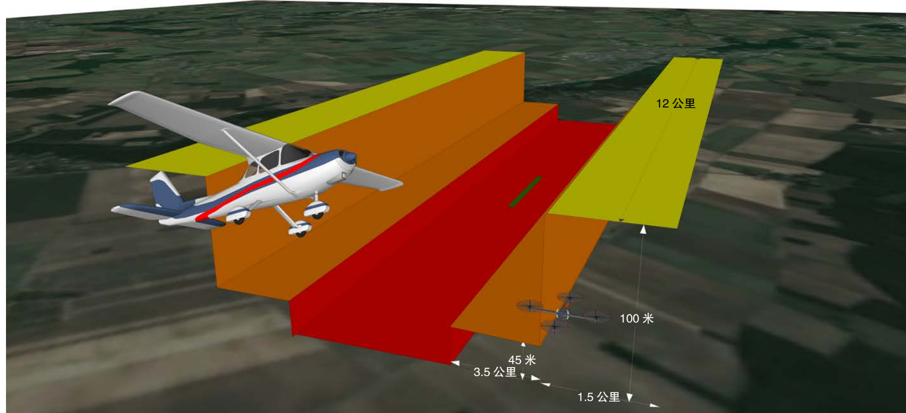


图 6-7 在跑道小于 1200 米的机场周围对无人机飞行高度的限制

包括飞机跑道长度在内的长方形区域为飞机升降区，禁止进入。长方形区域两端长度各加 5 公里（总长度约 12 公里），宽度为 1 公里。紧邻飞机升降区的两旁，无人机在宽 3.5 公里的区域内飞行高度不能超过 45 米，在接下来宽为 1.5 公里的紧邻区域内，无人机飞行高度不能超过 100 米。

情况 2：飞机场跑道长度大于 1200 米，或配备协助降落的辅助设施

包括飞机跑道长度在内的长方形区域为飞机升降区，禁止进入。长方形区域两端长度各加 15 公里（总长度约 32 公里），宽度为 5 公里。紧邻飞机升降区的两旁，无人机在宽 2.5 公里的区域内飞行高度不能超过 30 米，在接下来宽度为 3 公里的区域内，无人机飞行高度不能超过 60 米，在接下来宽为 2.5 公里的区域内，飞行高度不能超过 100 米。

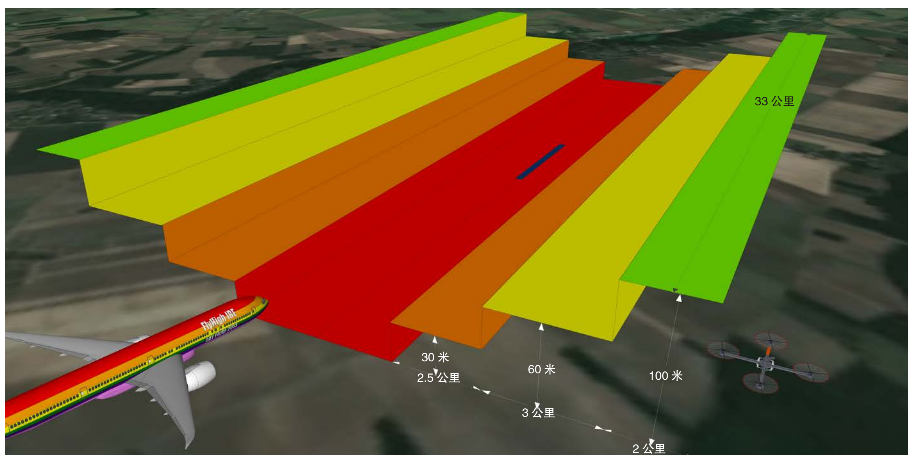


图 6-8　在跑道大于 1200 米的机场周围对无人机飞行高度的限制

情况 3：直升机停机坪

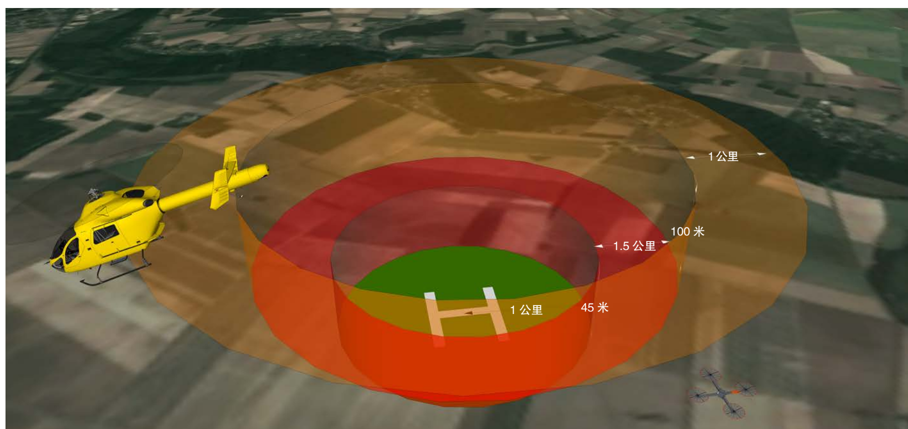


图 6-9　在直升机停机坪周围对无人机飞行高度的限制

在直升机停机坪周围的禁飞区和停机坪构成同心圆，在 1 公里半径之内不得使用无人机，在接下来 1.5 公里宽度的环形范围内，无人机飞行高度不能超过 45 米，在接下来 1 公里宽度的环形范围内，无人机飞行高度不能超过 100 米。

情况 4：超轻型飞行器跑道

包括飞机跑道长度在内的长方形区域为飞机升降区，禁止进入。长方形区域两端长度各加 5 公里（总长度约 11 公里），宽度为 1 公里。在接下来 1 公里宽度范围内，无人机飞行高度不能超过 40 米，在接下来 1 公里宽度范围内，无人机飞行高度不能超过 90 米。

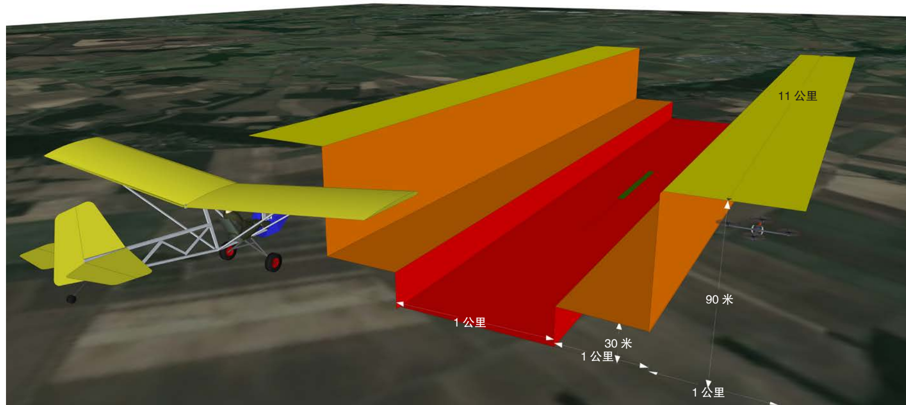


图 6-10　在超轻型飞行器跑道周围对无人机飞行高度的限制

法规的局限性

通过建立法规，无人机作为一个经济产业浮出水面，涌现出 500 多家无人机运营商和若干无人机制造企业。一个非常重要的优点需要记住：在法国，无人机产业相关法规的所有行政手续都是免费的。当然，和所有新生事物一样，无人机产业的法规同样需要完善。

- 毫无疑问，法国缺乏针对无人机操控人员的实际培训对现有系统危害最大。当前系统的主要规则仅仅基于上报资质的水平上，甚至对于单人公司来说，只要自动申报即可。大多数无人机运营商可能从来没有接受过培训，而这些运营商开设的培训学校往往也没有资质认证。超轻型飞行器的理论考试包括专门针对超轻型飞行器和普通载人飞行器的问题，和无人机没有任何关系。尤其是对无人机来说必不可少的问题（比如电力动力推进、聚合锂电池组的使用、对于无人机的特殊规定）反而没有。法国民用航空总局对无人机职业联盟的自我调整寄予很大期望，希望能够像超轻型飞行器一样制定培训标准。
- 无人机的使用许可无需任何检查，仅依靠信誉申报即可获得。除此之外，无人机

运营企业和法国民用航空总局缺乏实质性沟通，导致事故上报的时候无法彼此信任，而建立这种信任关系却必不可少。对于法国民用航空总局和无人机运营企业来说，统计机构同样重要，因为统计机构可以让法规作出相应改变，比如对保险公司事故理赔金数目的确定。无人机执行任务会发生事故，可是，因为害怕惩处，没人敢向上申报……在航空模型界中，航空模型常常坠毁，不会造成严重后果，很多无人机操控人员面对无人机也有类似的想法。现在，确实需要大力推动无人机行业各方面机构彼此进行真正的对话。

- 在最常见的情况下（飞行方案 S_3），在城镇所使用无人机的最大重量问题是一种严重制约（没有降落伞 2 公斤，配备降落伞 4 公斤），因为无人机本身重量往往就要超过 2 公斤。很多人对于降落伞的使用持不同观点，降落伞在无人机与建筑物相撞的情况下起不到效果，而且必须在 20 米高处开启降落伞才能够降低坠落速度。即使降落伞在折叠的情况下依然占据很大空间（而且降落伞质量相对较大）。
- 无人机禁飞区遍布于地图上，如同瑞士干酪的气孔般零散。无人机的应用越来越广泛，要求开放新的飞行区域属于合理要求，最终应该把无人机的使用纳入到空中交通整体规划之中。这一目标可以分为几步进行，这样也为无人机技术的进步、飞行程序的完善、人员的筹备留出时间。

人们已经开始着手研究在视野范围内短程飞行（飞行计划 S_1、S_3）或在视野范围内远距离飞行（飞行计划 S_2）。预计在 2016 年至 2018 年，飞机场周围会开始用控制塔进行管理，把无人机纳入按照飞行器种类管理的控制区域。在无人机操控人员和控制塔之间，将会建立一条始终保持联系的通信线路。

最后一个步骤是让无人机进入没有监控的飞行区域，这一切需要科技的进步：建立操控人员与无人机之间的远距离联系，发展“观察—躲避”的永久有效的系统。同时还需要加强工作团队的资质，提高原材料的质量，保证无人机的飞行状态良好。

军方低空飞行

无人机除了在民用领域需要避让普通飞机，还要考虑到军用飞行器。

法国军用空中交通局（DIRCAM）在网站上（http://www.dircam.air.defense.gouv.fr/dia/）发布了极低海拔防御网络图，其中一些部分紧挨地面。

比如，军队的轻型航空直升机会不分昼夜地在 0 米到 150 米的高度执行飞行任务。相关人员需要了解这些地区何时投入使用。

图 6-11　极低海拔防御网络图，其中紫色部分表示和地面接触

保护生活隐私

不论是专业用途还是娱乐用途，无人机能够让运营商或者使用者看到图像或者接收到声音，这些图像和声音可能涉及他人的私人生活空间。不论是否有意为之，在展示这些图像的时候，可能会同时看到一些个人或组织不希望公布于众的细节，很多私人信息都会被录制下来，比如汽车牌照、庭院的面积……

在拍摄一些人物照片时，需要了解是否侵犯了他人的权利。根据法国民法第 9 条及其司法解释，任何人在没有明确表示允许的情况下，都有权严禁他人传播包含本人在内的影像。在公共场合，该法律条款可以灵活执行。没有人希望在自己不知情的情况下被拍摄，只要看到无人机从花园上空飞过，无论是否拍摄了照片，都会使人感到不安。隐私问题不仅存在于获取数据的时候，还存在于储存、传播、使用这些数据的时候。另外，无人机只会自动获取海量的数据，不会加以区分。无人机机动性很强，而使用者所处距离很远，如

有冒犯行为，也无法捉住无人机背后的摄影师。为避免法律纠纷，谷歌街景会把照片中人的面部和汽车牌照进行模糊处理。

保护隐私并不是新鲜话题，法国建立全国自由与信息委员会（CNIL）就是为了这一目的。通过采用技术手段和方法可以保护个人隐私。根据法国刑法第 226 条第 1 款的规定，侵犯他人隐私可能被判处一年徒刑，并处以 45 000 欧元的罚款。

所以，在公共街路上使用监视摄像头受到严格限制：运营商要得到各省政府的许可证，负责在一定时间内保存数据，并保证数据安全，防止他人窃取。而且，在合法要求调取时，运营商应提供相应数据。无人机携带摄像头工作时，需要确定谁有权采集并观看拍摄到的画面。但是，如何通知那些被摄入镜头之中却不愿被拍摄的人，的确困难重重……

很明显，与只能使用无人机的 500 家无名小企业相比，人们更加容易接受让公开发布使用规则的研究机构经营无人机。

如果人们就正确、合理拍摄私人生活的各种规则达成共识，加之新软件和特殊设备的逐步完善，必将推动无人机产业的进一步发展。防止无人机入侵的地面隐私安全保护技术有待进步。目前，人们会采取其他应对设施，如探测器、无线电波或全球卫星定位系统干扰器、大炮……

第七章

怎样从组装元件开始走进无人机的世界？

“开始行动才有希望，坚持不懈方能成功。”

——吉尔伯·塞斯勃隆（Gilbert Cesbron）

本章将介绍正确组装无人机的工具和技术，以及如何准备小型多旋翼无人机的初次飞行。只要按照基本的安全规则行事，所有人都可以组装并放飞一架结构简单的无人机。螺丝、螺栓、垫片、板片……这些元件不禁让人联想到建筑组装玩具麦卡诺（Meccano）。而无人机“麦卡诺玩具”还需要安装电缆线、引擎、集成电路、电池。

组装无人机前需要注意的几点

防止受伤

无人机在飞行过程中可能致人受伤，造成损失，在组装时也可能导致各种伤害。建议严格遵守专用的说明书，最好在没有孩子和动物的房间工作，因为螺丝、各种颜色的电子配件、胶，都会吸引孩子的注意，引发危险。切记不要让孩子把这些东西放入口中。

另外，一些工具非常锋利。而且，一定特别注意电烙铁的使用：400 摄氏度时，可能导致多种原料起火。在使用电烙铁之前，必须把工作台清理干净。电烙铁在不用的时候，要放在防火架上。总之，必须杜绝点燃烙铁却无人看管的情况。同时，务必确保易燃的液体远离烙铁。

在加热时，锡作为焊接原料会呈现液状。液体锡可能会四处溅落，如果进入眼中会十分危险，建议佩戴护目镜。此外，锡散发出的烟有毒性，工作间必须保持通风良好。

为防止火灾，还要时刻小心电池和绝缘不良的电路。聚合锂电池组非常强劲，建议在不用的时候把电池组从无人机内取出。无论在工作间内还是在外执行任务，始终准备好急救箱，以防万一。

防止烧坏电路

虽说不需要取得电子科技的博士学位也能把电线连接到集成电路上，但是一定要弄清楚电极，使用适当的电压和电流强度。一根电线如果连接有问题，会产生各种结果：最好的结果是毫无效果；最坏的结果是一阵爆裂声之后，焦糊的气味四处弥漫，元件报废。

为电路通电之前，应该先弄清楚工作电压，检查插头方向。无人机的电压通常为 5 伏，这是控制器输出的标准电压。伺服插头有 3 根电线：黑色电线是零线，中间的红色电线是电源线，浅色电线是信号线。为了给电路通电，红色电线与黑色电线就足够用了，如果要发出信号，则需要浅色电线。红色电线被放置在插头中间，如此一来，即使方向插反也不会导致电路烧焦。飞行电池（比如 12 伏的飞行电池）插在配电板上，配电板把电力配送给各个引擎，另有 5 伏电压的出口，为无人机上的电子元件供电。该输出能够承受的电流强度足够供给接收器或发射器。如果想了解电池能否承受更大的电流强度，则需要查询说明书，比如为自动稳定吊舱的伺服供电。如果有需要的话，应该绕过自动驾驶仪，使用配备稳压器的单独电源负责供电。

自动驾驶仪一般配有二极管和警报器，指示有电流通过，正处于飞行状态。另外，还要看清楚自动驾驶仪的输入、输出端：输入端接收无线电接收器的信号，输出端把信号从自动驾驶仪传到引擎，或者同时传给连接着舵和实用载荷的伺服。

防止丢失零件

还有一种问题貌似平常，但同样会妨碍无人机的顺利组装，那就是丢失零件。大多数零件，尤其是电子元件并非标准零件。临时订购可能需要几个星期时间才能到货。应该把零件放置到大小合适的盒子或格架中，如果条件允许的话，还应贴上标签。买一个贴标签机绝不能算作浪费金钱，它会使你免除寻找零件的苦恼，节省宝贵的时间。

在订购无人机的时候，除了原始组件外，一定不要忘记购买一批替换组件，包括电缆线、插头等。你很快会发现，无人机第一次飞行将消耗很多零件，诸如螺旋桨、电动引擎、控制器、无人机底座零件。在飞机坠落时，很多零件散落四处，无法再找回。通常情况下，配套组件中包括所有必需的附属零件。另外，组装无人机还需要一些工具。



图 7-1　叠放的格架，任何零件都不会丢失

需要的工具和技术

组装无人机

组装无人机时，通常需要直径 2、3、4 毫米的螺丝、标准螺丝刀和内六角扳手。如果你厌倦了整天拧螺丝、卸螺丝，那就买一个电动螺丝刀吧，一定要注意与电动螺丝刀配套使用的螺丝种类和自己的无人机螺丝是否相符。

组装无人机旨在保证无人机底座的完整性和高强度：无论在飞行过程中还是在地面上，无人机都不应在撞击、震动等情况下出现底座螺丝松动或变得不坚固等情况。

如果要把金属螺丝拧到金属材料上的话，需要使用防松螺丝胶，这是一种膏状物，和普通胶不同，很容易弄碎后取下。选择中等强度的防松螺丝胶，不要使用强力防松螺丝胶，因为强力胶几乎无法从直径小的螺丝上取下。

除此之外，还需要夹起小型零件的器械，如电工钳子、小钳子（类似专业除毛钳）。铝制的螺丝、螺母重量是相同体积钢制螺丝、螺母的一半，可以让无人机总重量减轻 5%。对于那些不能活动和不需要经常拆卸的零件，铝是钢的优质替代材料。各种型号的一次性电缆线固定套的用量非常大，尤其是用于固定无人机支架上的组件。双面强化胶带有时被称为“伺服带”，用来固定套管里的轻型零件——比如传感器时，十分方便。为安全起见，除了电缆线固定套之外，还应再用胶带粘贴固定。

在此教给大家一个小窍门，为避免螺丝钉滚落到地上或挂在袖子上，可以把螺丝钉按种类放置在玻璃杯或广口瓶里，并使用磁力螺丝刀。



图 7-2 扳手（中间）；螺栓和螺钉（左侧）；垫片（下方）；接线帽（右侧）

接线与焊接

这一步骤需要的工具数量最多。

电缆线是两端为两个插头或者插座的线，常常有焊接接头，需要准备用来切割的钳子、剥线钳、割刀。

要根据电路能够承受的电流强度调整电缆线的直径及插头型号。

- 对电子元件来说，伺服电缆和插头足矣。
- 对于通过电流强度较大的配件来说，比如电池、配电盘、引擎，需要直径大的电缆线以及大型号的插头。微型标准插头（黑色）可以承受 10 安培的电流，标准插头（红色）可以承受 20 安培左右的电流，超过这一数值则必须使用 XT60 插头（黄色）。

需要使用焊接器材的机会很多：比如，在调试电缆线长度、更换插头时，焊接工作必不可少。大多数电池组在售出时不会带有插头，这样购买者可以根据电路类型选择合适的插头。所以，至少需要花钱购买能够调节温度的焊接器材。一台焊接器材既可以用来焊接伺服电线，也能焊接通过强电流的电缆线。电烙铁损耗最多的部件是让焊锡熔化的烙铁头，因此要准备替换件，以及大量的各种其他更换备件。不要忘记，在焊接前用热收缩套管包住电缆线，如虎钳、橡皮膏，或者请他人用手固定要焊接的零件，然后再开始焊接。焊接时，火焰产生的热量软化热收缩套管，完成焊接工作。热收缩套管还能用来强化保护脊部板面边缘的电线。应该准备各种直径和颜色的电线，与电缆线配合使用。

焊接必备

图 7-3　电焊工的全套装备

- 价格便宜的可调温电烙铁（上方左侧）
- 带有沉淀池和清洁器（有金属屑的盒子）的威乐（Weller）焊台（上方中间）
- 支撑架（上方右侧）
- 助焊剂
- 护目镜
- 切割钳、电缆线、插头
- 热收缩套管
- 打火机

在无人机飞行时，电路要承受引擎的震动（估计频率为 200 赫兹），在无人机突然降落时，电路要承受几个 g 的重力加速度，在温度升高时，电路还要承受体积增大的变化。如果焊接质量不过关，就会导致短路或电力供应切断，不可避免地引起坠机。比如，电流应该从电缆线之间的接触表面通过（通过电缆线彼此交织），而不是仅仅通过焊接处（仅是粘合剂）。助焊剂（rosin flux）增加待焊接部位的粘性，有助于锡的分布，利于电子流动，所以，在使用锡之前，要在待焊接的两部分上涂抹助焊剂，然后用湿抹布把剩余的助焊剂擦掉。焊接成功后，焊接的部位明亮光滑，如果焊接部位颜色灰黑、质地酥脆，说明焊接部位退火了，必须重新焊接。如果不确定焊接是否成功，建议用放大镜仔细观察，或用万用表测量电阻。如果我们想保证相邻的两个焊接点没有连接，必须使用万用表。在集成电路上，彼此相邻接近一毫米的伺服插座需要焊接固定。

每次使用后，电烙铁的尖部都要用潮湿的电工海绵擦拭清理，或者用清洁器——即一

种含有金属屑的小盒子清理。

对于一些特殊的焊接工作，比如焊接集成电路，若使用普通的电烙铁，即使是可调控强度的电烙铁，都显得捉襟见肘了。因为配电盘会吸收热量，导致电烙铁的温度不能保持恒定。这时，可能要在电烙铁的控温装置上投入一点资金，配备在任何情况下都保证温度恒定的探头。威乐等品牌的专业电烙铁售价超过 400 欧元，不过这笔投资有时还是必要的，比如在德国微型飞行器公司生产的无人机配电盘上焊接引擎电线时，就需要这种专业电烙铁。

焊接完电缆线后，使劲拽一下，测试焊接是否坚固，然后用套管连接固定焊接的电缆线。把热收缩套管裹在电缆线上，点燃打火机，移动打火机的火苗让热力传播。

正如你已经了解的，无人机上的焊接工作一定要完美无缺，想要达到理想的效果需要平时练习。建议第一次焊接无人机零件之前，先练习一下，可以参照各种视频网站上的众多教学视频。

安装程序

无人机制造商和无人机社团每年会几次推出程序和计算机固件。这些程序可在网络上免费获得，里边含有伴随无人机新组件产生的新应用，并且修正了前一版本程序中的错误。所以，加入无人机使用者的论坛，更新使用最新版本的程序非常重要。

为了更新固件或者进行程序调试，应该把自动驾驶仪和电脑相连，多数情况下用的是 Window 系统。在无人机制造商和无人机社团的网站上下载程序，通过 USB 接口或者无线网进行数据传递。USB 接口不但提供数据通道，还能够为集成电路供电，因此，一般情况下不需要额外插上飞行电池组。操控人员还可以把手提电脑带到现场进行调试、编程，并把地图作为背景观察无人机的飞行。

选择哪种无人机？

进入无人机领域的第一步是组装无人机、操控无人机、拍摄第一批照片和视频……初次体验会让使用者决定是否希望在无人机领域走得更远。

为了有一个良好的开端，应该从小型无人机开始（总重量大约 1 公斤）。在坠机的时候，无人机质量越小，最终的损失就越少。因为坠机事件一定会发生！而且，无人机的稳定性与大小成正比例，所以你可以更快地学会操控无人机。根据无人机操控人员是否希望使用自己的零件，是否想在无人机领域不断进步，可以有几种不同的选择。在网上订购非常容易，但可能买到不匹配的零件或不适合自己需要的装备。一定要在网上详细询问卖家，看卖家是否可靠，是否具备专业能力。或者，也可以亲身前往无人机的专卖店垂询。

表 7-1 市场上几种无人机的对比

种类	品牌与式样	GPS	优点	缺点
成品机	"鹦鹉 AR"第二代	有	和 iPhone、iPad 兼容	没有操纵手柄 无线电有效距离短
成品机	大疆"精灵"	有	设计优秀 GoPro 摄像机	飞行时间短：8 分钟 价格昂贵
成品机	地平线模型公司的"刀锋 350QX"	有	容易操作	不够坚固，简单款没有 GPS
成品机	泰世 Gaui 330	无	容易操作	没有 GPS
可以使用其他零件	大疆 F450	有	模块组合结构，容易调配	没有说明书
开源	配备开源自动驾驶仪的 3DR 四旋翼无人机"Quad D"	有	可作为参数 无人机社团中使用这种无人机的人数最多 可获法国民用航空总局许可	组装时间长，熟悉应用耗时长 没有说明书

选择 1：购买成品机

成品无人机的遥控器、实用载荷都一并销售，不需要动手组装任何部件，只要阅读说明书，为电池充电，无人机就能起飞！

娱乐用无人机每推出一个新的版本，其摄影、摄像质量就提高一次。最著名的是"鹦鹉 AR"无人机（大约 350 欧元）。现在，此款无人机的第二代或者大疆"精灵"无人机的销量最大。每个月，其他品牌都会推出无人机，比如美国地平线模型公司的"刀锋 350QX"无人机，口袋版无人机"哈博森 X4 H107D"售价约 150 欧元，此外还有华科尔公司的"小瓢虫"无人机。



图 7-4 检查大疆"精灵"无人机

这些无人机的飞行性能都非常优秀，在工厂里已经进行过调试。这种无人机很适合急着想驾驶无人机的人，只要花一点钱，就可以学到无人机遥控的操作知识，而且，还可以拍摄照片带回家。但也有缺点，此类无人机不能“进化”——无法更换遥控器或者实用载荷。另外，必须准备和原件一模一样的零件备用。专业用途不能使用这种无人机，因为其自动驾驶仪没有对高度与距离的限制。从法律角度上看，这种无人机只能在飞机模型场地和田野飞行。



图 7-5　流线型螺旋桨“精灵”无人机



图 7-6　地平线模型公司的“刀锋 350QX”无人机，带有视频通信和全球卫星定位系统

选择 2：添加零配件

如果无人机操控人员已经是模型飞机爱好者（飞机或者滑翔机），那他可能已经拥有无线电、电池、小型照相机或者 GoPro 摄像机，只是想在无人机上使用这些配件，希望学习无人

机组装技术，以便将来走得更远。可加入零配件的无人机和成品机一样，不能用于专业用途。

泰世 Gaui 330 无人机（小于 1 公斤的四旋翼无人机）打造了一代自动驾驶仪。这种无人机需要组装、接线、调试，但不用担心弄错，因为它所采用的是“即插即用”系统，不需要焊接，因此，也为初学者提供了了解自动驾驶仪运行方式的学习机会。无人机上可以安装吊舱，用以放置照相机，可惜的是，这种无人机没有全球卫星定位系统（如果不配备无线电，价格大约 350 欧元）。

在同一档次的无人机中，大疆创新的 F 系列无人机（F450）等级略高一筹，其优势在于配备了全球卫星定位系统，并拥有悬停模式和返航功能（如果不配备无线电，价格大约在 400 欧元）。



图 7-7　配备有 GoPro 摄像机的大疆 F450 无人机

选择 3：开源无人机

开源建构系统配有面向大众开放的源代码，程序员让无人机社团成员免费享受自己的工作成果。

使用 Arduino 开源自动驾驶仪（APM）得到了 DIY Drones.com 网站社团的支持，成员超过 50 000 人，其中约有 1000 名法国成员。该网站拥有一个博客和若干论坛，非常活跃，每天都有新的计划呈现，所有关于无人机的最新消息都可以在网站上找到。

无人机组件由加利福尼亚的 3DR 公司生产，完全可以参数调试并配备全球卫星定位系统。无人机的组装、焊接、调试需要十几小时才能完成，继而投入使用。在没有电池、实用载荷、无线电的情况下，这种无人机的价格大约为 500 欧元。我们将为大家一步步展

示如何组装一架装备 Arduino 开源自动驾驶仪的小型四旋翼无人机。

组装无人机：制造一架小型四旋翼无人机

四旋翼无人机的组件

我们选择的无人机是配备了新型开源自动驾驶仪的 3DR 四旋翼无人机（Quad D）。组装完成后，无人机总重量大约 1 公斤。这种无人机设计略显粗简（方形管状），元件数量不多，仅仅四十多个，而且很容易改装。

完整无人机的元件



图 7-8　无人机元件

下方：

- 卫星无线电接收器；
- 无线网络连接；
- 自动驾驶仪；
- 配电盘。

在长电线之上：

- 引擎；
- 控制器；
- 飞行电池（绿色）。

其余部分组成无人机底座。

只有接收器、电池、铝制螺丝需单独购买。

你还需要一个至少具有 5 条信道的遥控器（手柄需要 4 条信道，剩下 1 条信道用来控制各种飞行模式），遥控器上要有几个选项的开关。如果用有 8 条信道的遥控器，你可以实现所有飞行模式，还能控制照相机。这种无人机使用的是有 7 信道 2.4 吉赫频率的 Spektrum 7S 无线遥控器。从 2010 年开始，Spektrum 是第一个推出配备下行遥测联络功能的无线遥控器品牌。

无线网络连接可以避免地面调节 USB 电缆线的过度使用，以免占用大量空间。而且，对于航空绘图与飞行调节来说，无线网络连接也必不可少。

为避免兼容性问题，最好一起订购飞机底座、引擎、控制器、螺旋桨、电线和插头。模型商店里总能买到 4000 毫安时（最低电量）的 3S 电池。

组装步骤

第 1 步：组装支架和引擎



图 7-9　组装支架，固定引擎

引擎固定在无人机臂处，用两个螺丝钉拧紧，再加上一点防松螺丝胶。引擎的电缆线长达四十多厘米，可以截短到 20 厘米，这样不但减轻无人机重量，而且还节省空间。

第 2 步：在各自的支架上安装自动驾驶仪和配电盘

首先要找到指明无人机前方方向的箭头。组装者也可以自己作标记自助。

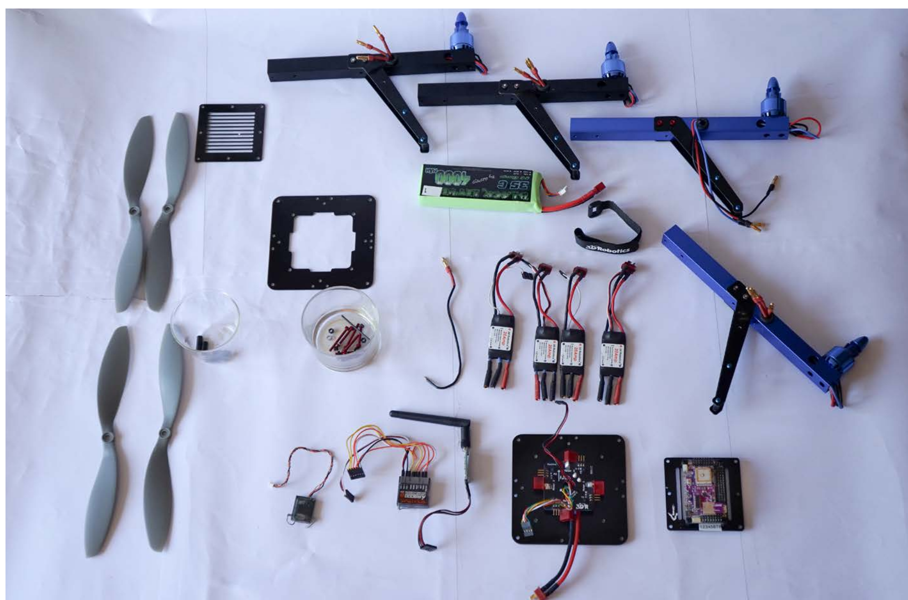


图 7-10　安装好的自动驾驶仪和配电盘

第 3 步：组装成十字形

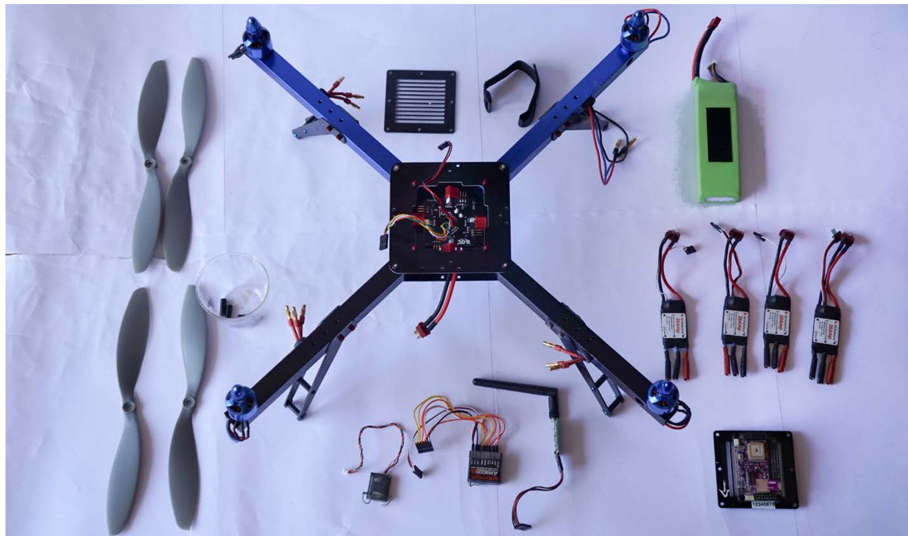


图 7-11　把无人机组装成十字形，这也是无人机最常见的外形

无人机在这一步最终成型：螺栓固定两片平板，将无人机臂夹在中间，下层平板承载配电盘。一定要让自动驾驶仪的前方、分线板的前方、底座的前方保持一致。无人机的蓝色臂指示哪个方向是底座的前部。

第 4 步：首次点火

控制器用电缆夹固定在无人机每个臂的侧面。在下层平板上用 Velcro 魔术胶带固定电池。

接线步骤

连接电源线

把 3 条引擎电缆线和控制器相连，把两条电源线、控制器的数据线和分线板相连。

连接控制器电缆线

在自动驾驶仪入口处应该连接：

- 电线对应接收器的各个通路，也就是说，至少要与 5 种运行方式对应，即立轴、横轴、纵轴、动力、飞行模式；
- 每条电缆线由一条红线和一条黑线组成；电缆线以 5 伏电压为无人机上所有电子元件（自动驾驶仪、接收器、无线网络连接……）供应电力；

> **注意**
>
> 一定要正确、妥善地连接电极，否则会令无人机无法正常运作！

- 由 4 条不同颜色电线组成的引擎电缆线伸出自动驾驶仪，引擎电缆线按照引擎顺序排列。

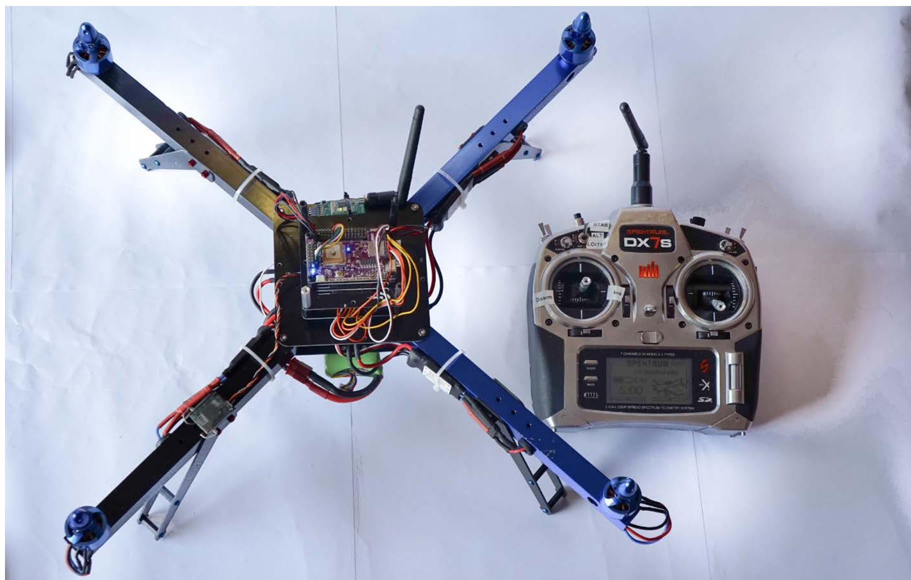


图 7-12　成功组装无人机，并给无人机接线

无线网络连在出口处有插头。

接线完毕后，只要把电池插好，保证所有元件正确连接，能够得到电力供应即可。出于安全考虑，所有的试验都必须在取下螺旋桨的情况下进行。在接通电源后，引擎应该发出嘟嘟声，自动驾驶仪接收器的二极管和无线网络连接的二极管发亮。

安装程序

在 Windows 系统下使用的 Mission Planner 应用软件可以免费下载。打开该应用软件后，通过 USB 接口把电脑和自动驾驶仪相连，加载自动驾驶仪的 Arducopter 固件。



图 7-13　在互联网上加载应用软件

更新固件时，应优先使用有线连接，而不要用无线网络连接，因为有线连接流量更大，速度更快。不过，对于在地面和飞行中的调整操作来说，使用无线网络连接已经足够。

为了确认电脑和自动驾驶仪是否已经连接，只需移动无人机：在屏幕上的飞机姿势仪向正确的方向移动，即表明连接成功。把无人机放在窗口，保证全球卫星定位系统显示无人机的位置。屏幕中间的地图指示了谷歌地球中无人机的所在街区。

应该特殊指明使用的无人机底座类型：该程序可支持众多类型，从四旋翼无人机到八旋翼无人机，还包括许多奇形怪状的无人机。对于本例来说，涉及的是四旋翼无人机，两个蓝色的无人机臂指示前方。

校对无线电、指南针、加速度计

通过打开相应的选项，实现对无线电、指南针、加速度计的校对。



图 7-14　所有引擎沿着正确的方向旋转：无人机准备起飞

校对无线电

通过移动手柄，屏幕上的功能指针应该朝正确的方向移动。自动驾驶仪记录手柄所有位置的最大值和最小值。如果指针朝错误的方向移动，应该在发射器上颠倒伺服电流的方向。

校对加速度计与指南针

该操作旨在让无人机根据一系列指定的动作，沿着各个轴线旋转。具体做法可以参照网上的视频。

最后检查

检查引擎是否朝正确的方向旋转。

为了避免无人机在不恰当的时候启动，无人机配备了安全装置，只有发射器手柄在立轴方向最右侧扳动，而且动力最小的情况下持续 5 秒钟，引擎才会启动。引擎启动后，自动驾驶仪的二极管停止闪烁，保持始终点亮的状态。增强一档动力，引擎发出嗡嗡声。如果引擎转动方向不对，只要把引擎和控制器连接的两根电线互换即可。

接下来要做的只剩下安装螺旋桨了，注意保证桨距符合旋转方向。

无人机处女航

在互联网上、工作间、商店中，经过了不知多少天、多少个星期的准备，无人机终于整装待发了。你已经学习了很多关于无人机运行的知识，知道如何制作、拍摄让人羡慕的视频。在法国，你最好应该已经拥有了法国航模联盟颁发的执照。如此一来，你会得到其他成员的帮助，找到合适的场地飞行，而且会在 www.ffam.asso.fr 网站上享受到民事责任保险。

保险能够在自己或者对他人人身和财产造成损失时，提供一份保障。



图 7-15 让无人机展翅飞翔并非毫无风险

特别安全指示

无人机首次飞行时，应该选择一个至少和足球场大小相仿的场地，不能有障碍物和大量观众，因为旋翼可能向任何方向飞出。建议事先获得场地拥有者的许可。等到风力很弱或者没有风的天气再进行处女航——如果无人机偏离航向，就意味着有调试问题，而不是由于刮风所致。通常来说，上午是最佳的飞行时间。

尤其在你亲自指挥处女航的时候，最好请一位助手帮忙，让好奇的人群保持距离。如果独自在空无一人的场地上，最好携带急救包。

学习操作无人机

我们现在将解释如何进行无人机操作试验，让你之前的努力不会付诸东流。

1. 逆风放置无人机，这样无论发生任何状况，无人机都会朝你的方向飞回来。

2. 慢慢增加无人机的动力，但不要让无人机起飞。移动手柄：你会感觉到发出指令后无人机的方向是否正确。如果方向不正确，应该在遥控器上调转伺服的方向。

3. 果断增加动力，让无人机悬停在 2 米高度。这是防止无人机受到螺旋桨刮起涡流影响的最低高度。首先遇到的困难是找到动力的平衡点，让无人机保持高度，最理想的是达到最大动力的一半。必要时，在遥控器上调整动力曲线：调整好的无人机在松开控制杆时，应该可以保持平衡。



图 7-16　在设置航标的航模场地进行无人机处女航

4. 让无人机从偏离航向状态回到正轨，首先使用手柄，然后进行调整操作返回到中间位置，始终要防止无人机偏离航线。使用被称作“微调器”的分级控制装置进行航线校正。松开遥控器后，无人机应该能够在空中悬停。当无人机偏离航线过远时，降低动力让无人机降落，取回无人机后重新开始飞行。经过几次飞行之后，你就能够掌握无人机空中的悬停技术了。

5. 此时，可以让无人机进行一些平移运动（在立轴不变的情况下，侧面倾斜飞行、向前倾斜飞行），最终回到中心位置。

6. 尝试让无人机与立轴重合的情况下，交替进行左侧飞、右侧飞，然后在侧飞的同时让无人机前进。尝试让无人机在你面前沿着平行线飞行。

7. 在无人机面对你飞行时，尝试同样的操作。这时，操作变得非常复杂，因为风从无人机背后吹来，无人机速度加快，和正常情况下相比，操作均变为反向操作。你需要花一些时间控制飞行轨迹，必要时，不妨先暂时休整一下，不时让无人机处于悬停状态。重要的是，不能让无人机上升到高于 10 米的高度，也不能让无人机过分远离。你逐渐能感受到惯性的作用：无人机在达到一定速度后，把操纵杆置于中立位，无人机需要继续滑行十几米才能减速，达到悬停状态。把控制杆拉向相反位置会让无人机减速，继而向后倒退飞行。这种操作适用于任何方向。由此可见，所有操作都依赖于操作手法的轻重和提前预备工作。

8. 在飞行几次之后，你可以尝试让无人机转弯。这种操作涉及无人机的前进（操纵杆向前）、前后摆（向前倾斜 20 到 30 度）和横摇。这要求初级操控人员精神高度集中，不过成功之后的感觉很棒，让人欢欣鼓舞！



图 7-17　无人机在 10 米高度飞行：注意不要让无人机飞得过高

在经过了十几次飞行之后，你就能够得心应手地控制自己的无人机了。此时，就到了尝试不同飞行模式的时候了。

- 定高模式：为了让操控人员放松神经，不至于始终通过调整动力控制飞行高度。
- 悬停模式：在有风的时候，无人机会有摇摆远离的倾向，往往在盘旋飞行后回到目标地点。
- 返航模式：只需轻轻一点，无人机就回到出发点。这种功能非常实用，能够防止无人机远离丢失。



图 7-18　观众似乎很喜欢无人机

调节各项参数

经过处女航之后，操控人员一定会觉得无人机过于平稳或者不够平稳，为了解决这些问题，需要调节各项参数。

参数决定了无人机的速度、功率，以及自动驾驶仪从预设值（操纵中的某个动作、在全球卫星定位系统上指定的位置）到实际值（无人机在某个轴上的姿势、距离全球卫星定位系统上指定位置的距离）的反应时间：参数越多，无人机的操作性越强，但稳定性越差。在松开控制杆后，这些参数也会调节无人机重新保持稳定姿势的能力。

这些参数分为比例参数（*P*）、完整参数（*I*）、衍生参数（*D*）。

- *P* 与反应强度对应：想象一下，假设无人机与全球卫星定位系统上的指定地点之间以橡皮筋相连，橡皮筋过于松弛就无法发挥作用，过于紧张则会将无人机抛射超出预定目标。

■ *I* 与反应时间对应：距离目标越远，回应越强烈。

■ *D* 与反应速度对应：比如，无人机改变姿势。

要根据每架无人机的重量分布、底座重心、携带实用载荷的机身总重量，分别调节参数。而且，还要根据执行飞行任务的类型进行调节。比如，需要无人机翻筋斗时，参数要增多，需要平稳飞行拍摄时，参数要减少。此外，参数的改变还取决于天气，以便让无人机更加稳定，更好地平衡风力。如果参数过多，无人机会在接近全球卫星定位系统指定地点时围绕该地点盘旋，盘旋半径越来越小，速度越来越快，如同要被旋风卷走一样。在这种情况下，要停止“悬停模式”飞行模式，减少参数总量。

上述调节可以在地面上进行，不过，为了看到调节是否有效，最好还是在飞行过程中进一步调节。在遥控器上指定一个滚轮调节，或者在电脑、智能手机上通过无线网络修改数值。

自动驾驶仪提供了各种调节手段，选择条件的范围很宽。最简单的是成品无人机调节方式，即“一调到底或者不做调节 = 花样飞行或者平稳飞行”。最精确的是在开源自动驾驶仪上用 *P*、*I*、*D* 选项输入以厘米为单位的数值。

为什么无人机无法飞行或飞得不好?

在无人机处女航的过程中，组装问题、参数调节问题、网络连接问题或电力供给问题才会一一暴露出来。不同原因可能导致相同的“症状”，应该对故障成因做出推测，然后一个一个地排除。进行测试，使用新零件替换，可以节省时间。练习飞行应挑选没有风的时间进行，注意把电池充满电。

表 7-2　常见故障的处理方法

领域	故障表现	推测	解决方法
启动	所有引擎都不能启动	动力遥控装置没有接入正确的电路	检查是否选择了正确的动力遥控装置
		引擎没有开到启动位置	校准无线电：保证数值达到预定的最小值和最大值
		电池没电	检查电池状况
	一个或多个引擎不转动	无人机没有平置，上方的引擎不能启动	把无人机放平
		自动驾驶仪—电子稳定控制系统—引擎系统链故障	用电压表检查是否有电流通过；或用另一个引擎或电子稳定控制系统检测；或更换故障零件
		自动驾驶仪中选择的无人机类型和实际使用的无人机类型不相符	检查
		引擎阻塞	可能有杂草绞进引擎，需要将其清除

领域	故障表现	推测	解决方法
飞行	无人机起飞后转回	应该安装顺时针转动螺旋桨的地方安装了逆时针转动的螺旋桨，或是相反的情况	更换螺旋桨
		一个引擎转动方向错误	在电子稳定控制系统和引擎之间的 3 条电缆线中，对调其中 2 条；或在程序软件中调换顺序
			检查引擎是否连接在自动驾驶仪的正确出口处
			检查在飞行程序中是否选择了正确的无人机类型
		自动驾驶仪安装不正确	检查自动驾驶仪安装方向是否正确，是否有间隙，是否防震
	无人机不稳定	偏航调节环路（PID）不合适	检查
		遥控器过于敏感：无人机导航反应过于强烈	在遥控器上调节伺服的进程曲线：调整指数让动作缓和，趋于中性
		无人机底座不够坚固	检查结构是否完整；拧紧螺丝
		电池耗尽	检查电池状况
		无人机负载过重	检查重量
	无人机向错误的方向出发	遥控颠倒	在遥控器上把伺服连接颠倒过来
	无人机向一个方向出发后无法返回	无人机失去平衡	检查无人机平衡情况；如有必要，更换无人机零配件
	无人机“悬停模式”功能无法使用	收不到全球卫星定位系统或接收困难	检查卫星数量以及全球卫星定位系统信号强度
		无人机沿同心圆旋转	校正指南针； 检查偏航调节环路
	“定高模式”功能无法使用	负载过度	检查重量和 / 或改变动力曲线
		电池耗尽	检查电池状况
		加速度计紊乱	校正加速度计
		指南针紊乱	校正指南针
实用载荷	没有视频反馈	视频发射器和接收器没有在同一信道上	修改接收器信道频率，使用发射器的信道频率
		摄像头电池耗尽	检查电池状况
		高清晰多媒体接口插头—将数字信号转换为模拟信号的转换器—视频发射器，这一系统链条出现故障或者电力供给有问题	检查连接和电力供给
	图像不稳定	一个或多个引擎震动	检查吊舱的绝缘体，平衡螺旋桨
	摄像头无法保持从上向下的稳定姿势	摄像头没有固定在重心上	确认把摄像头固定在重心上

余下由程序故障导致的问题，只要重新启动就能解决。如果问题仍然存在，询问无人机生产商或者无人机使用者论坛。

现在，你已经学会如何使用开源无人机，对于无人机接线、焊接、组装方面知识的了解越来越多。你拥有了各种必需的材料、合适的工具，参加了无人机俱乐部或者论坛，其他无人机爱好者可能已经给了你不少帮助和启发。或许有一天，你会再跨出一步，进入专业无人机领域……

结束语

如今，无人机性能尚不完善，相关法令的控制也非常严格，这一切却不能阻挡民用无人机数量的飞速增长。在法国，民用无人机产业蓬勃发展，抵消了军用无人机产业停滞不前带来的弊端。反之，美国无人机技术发展潜力巨大，但商业应用领域仍对无人机紧闭大门。

很多年轻企业投入到无人机领域的冒险之中，耐心等待着决策者们允许无人机从实验领域进入应用产业的一天。等到无人机获准进入空中交通行业的时候，无人机运营机构的数量还会增加。不过，运营机构需要具备一定的硬件条件，如“观察—躲避”设备、强有力的控制联络系统、无人机和程序的相关许可；同时，还需大力发展人力资源，提高运营团队的资质。尽管无人机技术日新月异，每个月都有技术革新，大多运营机构却并不具备上述条件。在众多技术革新中，有三大主要成果：燃料电池，已应用于军用无人机，可让无人机的续航能力提高到原来的三倍；惯性测量单元，经过证实，可以代替全球卫星定位系统精确定位，而且能在建筑物内部航行；新型激光雷达，能更好地探测障碍物。

无人机会不会让普通飞机走下历史舞台？如果认为会的话，那就大错特错了。事实恰恰相反。商用飞机将逐渐采用正在研发的无人机自动装置，比如飞行员如果突然生病，可以启动自动降落系统。同样，包括无人机在内的所有交通工具都会从无人驾驶汽车技术中获益。现在，尽管无人机作为飞行工具的优势尚未发挥其全部光彩，但在今天的客户眼中，无人机研究的相关数据已展露出宝贵价值。

附录A
词汇表

X 轴、Y 轴、Z 轴

分别对应经度、纬度和高度。

八旋翼无人机

拥有八个螺旋桨的无人机。

地理信息系统（GIS）

利用地理学、遥感技术和计算机技术对空间内地理信息进行三维显示、数据管理和运算的技术系统。

对转（直升机）

没有尾部螺旋桨的直升机式无人机。两个旋翼上下反向同轴转动，提供了升力和反作用力。

法国飞机、滑翔机、超轻型飞行器（ULM）性能的理论证书

通过飞行理论考试后获得的证明，考试内容涉及天气、飞行机械、航空、法律等。

法国空中运输军警队（GTA）

法国民用航空总局的分支机构，负责让民众遵守空中交通法律。

法国民用航空总局（DGAC）

法国民用航空总局负责管理法国境内的所有空中活动。

飞行方案

法国 2012 年 4 月 11 日法令中规定的飞行方案 S_1、S_2、S_3、S_4 明确了无人机执行任

务时应该遵守的的高度、距离、重量和环境种类 (有人或者无人)。

飞行高度

无人机相对于地面的高度。法国法律规定不能超过 150 米，目的是和大多数在此高度上方飞行的飞行器分开。在山上，飞行高度可以是 100 米，但其海拔飞行高度能达到数千米。

飞行海拔高度

从海平面算起的飞行高度。

飞行距离

自动驾驶仪和无人机之间的距离。在飞行方案 S_1 和 S_3 中，该距离不能超过 100 米；在飞行方案 S_2 中不能超过 1000 米；在飞行方案 S_4 中，无人机超出视野范围，飞行距离根据情况而定。

飞行模拟器

用有以下功能的程序：

- 飞行教学；
- 显示预先设定的飞行轨迹，检查飞行器是否遵守高度和距离限制。

飞行模式

依据自动化递增的顺序，包括：手动飞行模式、稳定模式、定高模式、悬停模式、返航模式、自动起飞模式、自动降落模式、到达中继点模式。

固定机翼无人机

通过前进产生的风获得升力的飞机、滑翔机、飞翼机式无人机，能够在引擎停止运行的情况下滑翔。

固件

英文为 Firmware，所有电子产品上的程序。自动驾驶仪、无线电遥控器和照相机上的固件要定期更新，保证获得新的功能，改进性能。

航空模型

娱乐用无人机，只能在城镇之外使用，最好在航空模型场地使用，并不适用于空中工作。

激光雷达（Lidar）

英文 Light detection and ranging 的缩写。此类雷达不使用无线电波，而使用肉眼不可见的光线或者红外线。可以利用这种雷达建立三维模型。

技术材料

带有图表的文档，描述业余无人机构造，尤其是无人机的安全设备。使用者要把该文档交给法国民用航空总局。

监视

要求长时间（长久）观察目标，发现目标状态变化的任务。

聚合锂电池组

民用无人机最常用的电池，特点是能量密度大，放电率高。该电池组由数块 3.6 伏的电池组成。每块电池电压不能下降到 3 伏以下，否则会对电池组造成损害。

空气动力

风作用于机翼而产生的升力、正面阻力、拉力。

控制点（定位点）

空中可见的目标，一般来说是地面上固定的白色木板，用十字标注。目标的详细地理坐标是地理测量法需要处理的输入数据。为提高精确度，目标应该在工作区内均匀分配。

类型一致证明书

无人机制造商发放的证明书，证明无人机拥有在法国使用的许可。另外，无人机运营商还会提供另一份一致性证明，表示无人机没有经过改装。

六旋翼无人机

拥有六个螺旋桨的无人机。

拍摄摄像头

小型摄像机 / 照相机，可以拍摄动作进行中的运动，装备有超大广角“鱼眼”镜头。GoPro 摄像机是无人机上作为实用载荷最常使用的摄像机。

皮托管

固定机翼无人机机翼前缘下方的小管，和压力传感器相连，测量相对于空气的速度。通过测定周围气压（静止）和动力气压（无人机前进时产生的风）的差别，确定速度。

偏离航向

由于风的干扰或者接收不到全球卫星定位系统信号，偏离飞行计划或者偏离悬停位置。

全球卫星定位系统（GPS）

全球卫星定位系统的精确度在水平方向和垂直方向大约为 10 米左右。使用该系统时，空中不能存在阻挡视线的障碍物。在森林或者城市，该系统使用效果不佳，在建筑物内则完全无法使用。

摄影测量法

一种摄影方法，按照一定的方向，用恒定的覆盖率拍摄照片，再将照片组合在一起形成全貌。摄影测量法能够建立正射照片和数字地面模型，从中计算出测量的距离和体积。

实境驾驶飞行

通过观看无人机发送回的视频，直接遥控无人机的方法。只有在操控人员能够观察到无人机的情况下方能允许这种遥控方式。

实用载荷

无人机为了执行任务而装载的物品，通常是照相机。

数字表面模型（DSM）

通过摄影测量或者激光雷达得到的三维地表面模型。在去除了人造障碍物和植被之后，可以呈现数字地面模型（DTM），并在模型上标出等高线。

四旋翼无人机

有四个螺旋桨的无人机。

伺服电动机（伺服）

启动机舵或者吊舱的引擎，由一个电力引擎、一个电位计、一个用来增大力量的齿轮系统组成。

速度控制器

英文为 Electricity Speed Controler，旨在把飞行电池提供的直流电转换成三相交流电后，输送给无刷电动机。该组件通过调整每秒冲电力脉冲的数量决定引擎转动速度。

特殊活动手册

运营商根据行动结构撰写的文件，描述了无人机群的组织、组成、飞行计划、行动模式。该手册需要通过法国民用航空总局的批准。

体积计算

用土地三维模型计算挖掘的土地体积。

陀螺仪稳定吊舱

支持一个、两个、三个轴，目的是保证摄像头的稳定与控制。性能最好的吊舱装备有无刷电动机。

无人机

英文为 Drone，通俗地讲，指代所有机上没有驾驶员的飞行器。

无刷电动机

三相无刷电动机，特点是功率强，不需要特殊维护，效率大约为 90%。

旋翼无人机

通过旋翼旋转产生升力的多旋翼或者直升机式无人机，能够在空中悬停。

延迟

从无人机机载摄像头捕捉到图像，到地面控制台看到图像之间的时间。如果这段时间超过 1 秒钟，就很难控制实用载荷或者仅能用视频遥控无人机。

翼尖

英文为 Wingtip，机翼末端垂直部分，可以在飞翼机转弯时提高精确度、保证海拔高度。

用无人机检测建筑

操作无人机靠近建筑，一般来说，从高处拍摄高清照片，能发现可能存在的缺陷。

远程遥控

对无人机的控制。

运营机构 / 运营商

负责无人机群经营的企业、组织或个人。

侦查

要求在短时间内观察目标，获得目标即时状态的任务。

正射照片

带有地理参照的高清晰平面照片，通过摄影测量获得。

指南针

通过磁力指向北方的仪器。主电池组持续通过的电流产生的磁力效应会影响其使用。

自动驾驶仪

“自主行动驾驶仪器”的简称。该组件通过海拔高度传感器、速度传感器、加速度传感器、全球卫星定位系统信号，驾驶无人机并保证其稳定性。

自动起降

自动飞行过程中的两种程序。

- 旋翼无人机：垂直上升，然后在 2 米高处悬停。引擎停止，无人机速度下降，降落着陆。
- 固定机翼无人机：用最好的角度上升。着陆线路分成几部分：返航、顺风飞行、侧风飞行、最终在接触地面前关闭引擎。

附录B
实用信息

本书相关无人机

MQ9“死神”	MQ9 Reaper
RQ-11“渡鸦”	RQ-11 Raven
RQ-4“全球之鹰”	RQ-4 Global Hawk
艾伦侦察机	Aeryon Scout
苍鹭	Heron
传感飞行 – 电蜜蜂	senseFly eBee
达索“神经元”	Dassault Neuron
大疆“精灵”	DJI Phantom
刀锋 350QX	Blade 350QX
德莱尔 DT18	Delair-Tech DT18
电影明星 6	Cinestar 6
多旋翼 G4	Multirotor G4
多重导师	Multiplex Mentor
格洛普纳 GR 32	Graupner GR 3
哈博森 X4 H107D	Hubsan X4 H107D
狐狸 – C8	Fox-C8
监控师 700	Spyder 700
猎隼	Faucon
猎鹰 8	Falcon 8
掠食者	Predator

鸟瞰	Birdseyeview
瑞安	Ryan
三角洲 H 型	Delta H
天宝 X100	Trimble X100
天狼星	Sirus
西贝尔 X100	Schiebel X100
小瓢虫	Lady Bird
信息创 IT180	Infotron IT180
雪鸮	Harfang
鹦鹉 AR	Parrot AR
萤火虫	Lighting Bug
直升机 4 号	Copter 4

无人机生产商

奥尼克斯星公司	Onyxstar
比利时飞行镜头公司	Flying Cam
比利时空中英雄公司	Sky Hero
德国飞行机器公司	Aerobotics
德国麦芬奇公司	MAVinci
德国迷你无人机公司	Microdrones
德国上升科技公司	Ascending Technologies
德国微型飞行器公司	MikroKopter
法国创新模型公司	Novadem
法国德莱尔技术公司	Delair-Tech
法国飞行 – N – 传感公司	Fly-n-Sense

法国勘测直升机公司	Survey Copter
法国勒曼航空公司	Lehmann Aviation
法国三角洲无人机公司	Delta Drone
法国信息创公司	Infotron
法国鹦鹉无人机公司	Parrot
荷兰简洁飞行方案公司	Clear Flight Solutions
加拿大艾伦研发公司	Aeryon Labs
美国地平线模型公司	Horizon Hobby
美国门翼公司	Gatewing
美国诺斯普诺・格鲁门公司	Northrop Grumman
美国天宝公司	Trimble
美国天空环境公司	AeroVironment
美国通用原子公司	General Atomics
美国自由飞翔公司	Freefly
欧洲空中客车集团	Airbus Group
瑞士 / 法国传感飞行公司	SenseFly
天空革新公司	Air Innov
无人机服务公司	Service Drone
中国广州华科尔科技有限公司	Walkera
中国深圳大疆创新科技有限公司	DJI

运营商

DRONEA

欧洲运营商，无人机工程监督和建筑物检测领域龙头企业。该公司曾经参与电厂建设等重大工程建设。

论坛

DIY Drones

http://diydrones.com/

MikroKopter

http://forum.mikrokopter.de/

RCGroups

http://www.rcgroups.com/forums/index.php

民间组织及政府机关

法国民用无人机职业联盟（FPDC）

http://www.federation-drone.org

法国航空模型联盟（FFAM）

http://www.ffam.asso.fr

法国民用航空总局

http://www.developpement-durable.gouv.fr/-Secteur-Aerien,1663-.html

国际无人机系统协会

http://uvs-international.org

法国航空主题开发工业园区

巴黎大区 ASTech 航天航空工业园

艾克斯—普罗旺斯 Pégase 产业集群

图卢兹和波尔多 Aerospace Valley 航空航天谷

航空航天展

法国波尔多无人机展（UAV Bordeaux），两年一次，在 9 月举办

法国布尔日航空展（Salon du Bourget），两年一次，是世界规模最大的航空展会

德国 Intergeo 地理技术展，每年一次，在德国不同城市举办，是欧洲规模最大的地理技术展会

欧洲防务展览（Eurosatory），每年 6 月在法国 Villepinte 举办，地面武器展会

法国科技与无人机展（Technology and Drones），每年 6 月在法国 Chaumont 附近的第 51 炮兵团营地举办

法国农业展（Salon de l'agriculture），每年 2 月举办

UAV-G，每年一次，在欧洲不同城市举办，由各大学组织的地质信息处理和无人机的展会

德国纽伦堡国际玩具展览会（Toys Fair），每年 2 月在纽伦堡举办，是欧洲规模最大的模型展会

参考书目

Paul Gerin Fahlstrom and Thomas James Gleason, *Introduction to UAV Systems*, Wiley, 2012, 280p.

Océane Zubeldia, *Histoire des drones*, Editions Perrin, 2012, 238p.

Randal W. Beard and Timothy W. McLain, *Small Unmanned Aircraft - Theory and Pratice*, Princetown University Press, 2012, 352p.

Michel Kasser and Yves Egels, *La photogrammétrie numérique*,Editions Lavoisier, 2001, 379p.

Plamen Angelov, *Sense and Avoid in UAS - Research and Applications*, Wiley, 2012, 384p.

图片版权

图 1-1,1-13 (US Army), 图 1-3 (David Conover), 图 1-8 (Valdivarius), 图 1-9, 图 1-11 (Stacey Knott for US Air Fore), 图 1-16 (IEMN), 图 1-2 为公版图片。

图 1-4(Deutsches Bundesarchiv), 图 1-5 (AElfwine), 图 1-7 (Duch.seb), 图 1-12 (Calips), 图 1-15 (Tangopaso) 为 CC-BY-SA 协议文本。

图 1-6(Kogo) 为 GFDL 协议文本。

图 2-1©Delair-Tech

图 2-3©Lehmann Aviation

图 2-2, 图 2-12, 图 2-15, 图 2-16, 图 2-47 及图 2-48©UAV-G Rostock

图 2-5©Survey Copter

图 2-7©Infotron

图 2-9©Delta Drone

图 2-18©Clear Flight Solution

图 2-19©Aerobotics

图 2-20©Microdrones

图 2-51©Opale Paramodels

图 3-1©Éditions de Breteuil

图 5-9©Henri Kenhmann (China Military Information Channel)

图 5-10©Airinov

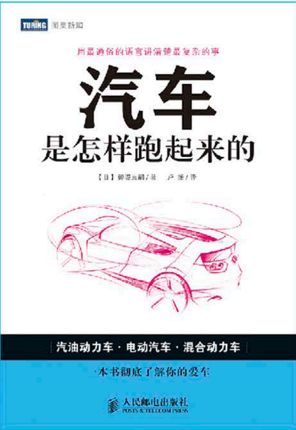
图 5-11©AEP

© Rodolphe Jobard 拥有本书其他图片版权

图灵好书推荐



ロボット
机器人科技
技术变革与未来图景
［日］日本机器人学会 著
テクノロジー
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



TURING 图灵新知
用最通俗的语言讲清楚最复杂的事
汽车是怎样跑起来的
汽油动力车 · 电动汽车 · 混合动力车
本书彻底了解你的爱车
人民邮电出版社
POSTS & TELECOM PRESS



无人机正在为大众带来最酷炫的全新飞行与应用体验：自创航拍杰作、探索无人秘境、实现飞翔梦想、传递独一无二的爱意……你早已跃跃欲试，想驾驶属于自己的无人机，却不知如何入手？本书将探讨无人机迈向民用领域的广阔前景，以简单易懂的语言和丰富彩图全面介绍无人机的必备知识和应用窍门，手把手教会普通大众体验这项尖端飞行技术，也为无人机业界的专业人士和驾驶员提供技术参考。

祝你飞行愉快！

在这个科技引领变革的时代，无人机正在创造着新一轮的奇迹，未来无疑将会极大地改变人类的生活方式。本书用生动清晰的语言向读者描述了无人机的发展历程和工作原理。更重要的是，它告诉大家如何制作一架属于自己的无人机，为立志参与这场技术变革的人照亮了前方的道路。

——**王伟韵**，“爱无人机”论坛创始人（www.loveuav.com）

图灵社区：iTuring.cn
新浪微博：@图灵教育 @图灵社区 @图灵新知
微信公众号：turingbooks ituring_interview
反馈/投稿/推荐邮箱：contact@turingbook.com
读者热线：(010) 51095186-600

分类建议 科普/航空与航天

人民邮电出版社网址：www.ptpress.com.cn



ISBN 978-7-115-40471-8

定价：59.00元

看完了

如果您对本书内容有疑问，可发邮件至contact@turingbook.com，会有编辑或作译者协助答疑。也可访问图灵社区，参与本书讨论。

如果是有关电子书的建议或问题，请联系专用客服邮箱：ebook@turingbook.com。

在这里可以找到我们：

微博 @图灵教育 : 好书、活动每日播报
微博 @图灵社区 : 电子书和好文章的消息
微博 @图灵新知 : 图灵教育的科普小组
微信 图灵访谈 : ituring_interview，讲述码农精彩人生
微信 图灵教育 : turingbooks